



Technische Universität Darmstadt

Fachbereich 16 · Maschinenbau

Belastung und Beanspruchung von Motorradfahrern bei der Bremsung mit verschiedenen Bremssystemen

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte
Dissertation
vorgelegt von
Dipl.-Ing. Joachim Funke
aus Otzberg

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kurt Landau
Tag der Einreichung:	18. Januar 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	2. Mai 2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Fachgebieten Fahrzeugtechnik und teilweise auch Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die gewährte Selbstständigkeit bei der Bearbeitung der Projekte. Über die fachkundige wissenschaftliche Betreuung hinaus habe ich ihm vieles zu verdanken, was mich auf meinem weiteren Lebensweg begleiten wird.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, der sich trotz der vielschichtigen Aufgaben durch die Übernahme der Leitung des Fachgebiets Fahrzeugtechnik 2002 Zeit für mich nahm, danke ich für die vielen wertvollen Anregungen und Hinweise, die er mir für den Abschluss meiner wissenschaftlichen Arbeit gegeben hat. Des Weiteren bedanke ich mich für das unkomplizierte Prozedere bei der ungeplanten Übernahme des Referats gegen Ende meiner Arbeit.

Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau, dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets Arbeitswissenschaft, danke ich für die fachliche Betreuung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet und darüber hinaus sowie die freundliche Übernahme des Korreferats.

Meinen Kollegen von den Fachgebieten danke ich für die stets offenen Türen für fachliche Diskussionen und den freundschaftlichen Umgang miteinander. Den Werkstätten des Fachgebiets Fahrzeugtechnik danke ich für ihr Engagement, mit dem wichtige Arbeiten – oft unter Zeitdruck – an Versuchsvorrichtungen und meinen Versuchsmotorrädern durchgeführt haben.

Besonders möchte ich mich bei meinen vielen studentischen Mitarbeitern bedanken, die als Diplom- und Studienarbeiter oder wissenschaftliche Hilfskraft an meinen Projekten gearbeitet haben. Nur durch ihre Mitarbeit konnte ich die gesteckten Ziele erreichen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Bundesanstalt für Straßenwesen, dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft und dem ADAC danke ich herzlich für die finanzielle Förderung meiner Forschungsprojekte. Weiterhin danke ich den Firmen BMW, Bosch, ContinentalTeves, FTE automotive, Dr. Maus Elektronik und Opel für die ideelle und gegenständliche Unterstützung. Besonders danke ich meinem Bruder Axel mit seiner Firma Zweirad Norton für die ausnahmslos zeitkritisch in zahlreichen Nacht- und Wochenendschichten durchgeführten Wartungs- und Reparaturarbeiten an den strapazierten Versuchsmotorrädern mit oft aufwändiger Rücksichtnahme auf die empfindliche Messtechnik.

Vielen Dank meiner Mutter und meinen Geschwistern für das entgegengebrachte Verständnis. Ohne den gewährten Rückhalt wäre mir meine Arbeit an der TU Darmstadt schwerer gefallen. Meinem früh verstorbenen Vater danke ich dafür, dass ich das Studium beginnen konnte.

Besonders danke ich meiner lieben Frau Vika. Ihr Verständnis und ihre Unterstützung gepaart mit sanftem Nachdruck haben mir insbesondere bei der Fertigstellung dieser Arbeit sehr geholfen.

Otzberg, im Januar 2006

Joachim Funke

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VII
Zusammenfassung	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 ABS	3
1.2.2 Kombinationsbremssystem	4
1.2.3 Gesetzgeberische Aspekte	7
1.3 Stand der Forschung	8
2 Grundlagen der Motorradbremsung, Ableitung von Hypothesen und Voruntersuchungen	14
2.1 Physische und psychische Belastung	14
2.2 Physische und psychische Beanspruchung	15
2.3 Fehlverhalten des Motorradfahrers während der Bremsung	17
2.4 Fahrerfahrung und Fahrbegabung	19
2.5 Radblockade aufgrund von Bremskraftüberhöhung	20
2.5.1 Fahr- und Sturzverhalten bei einer Hinterradblockade	21
2.5.2 Ablauf eines Sturzes nach einer Vorderradblockade	24
2.6 Bremsleistung, Belastung, Beanspruchung und Befindlichkeit	28
2.7 Definition der Einleitungsphase einer Bremsung	32
2.8 Aufstellung der Arbeitshypothesen	42
3 Versuchsgestaltung	44
3.1 Versuchsdurchführung und Versuchsstrecke	44
3.2 Versuchswerkzeuge	49
3.2.1 Versuchsfahrzeug	49
3.2.2 Testpersonen	55
3.2.3 Physiologische Messtechnik	59
3.2.4 Psychologische Werkzeuge	60

4 Versuchsergebnisse	62
4.1 Intraindividuelle Betrachtung	62
4.1.1 Vorhandensein eines Blockierverhinderers	62
4.1.2 Standard- und Kombinationsbremsanlage	71
4.1.3 Einhebel- und konventionell zweihebelbedientes Kombinationsbremssystem mit ABS	75
4.2 Interindividuelle Betrachtung	79
4.2.1 Fahraufgabe	79
4.2.2 Vorhandensein eines Blockierverhinderers	80
4.2.3 Standard- und Kombinationsbremsanlage	88
4.2.4 Einhebel- und konventionell zweihebelbedientes Kombinationsbremssystem mit ABS	89
4.3 Schlussfolgerungen	90
4.3.1 Intraindividuelle Betrachtung	90
4.3.2 Interindividuelle Betrachtung	91
4.4 Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse	92
4.4.1 Versuchsaufbau	92
4.4.2 Versuchsfahrzeug	93
4.4.3 Testpersonen	94
4.4.4 Fazit	95
5 Ausblick	96
6 Anhang	98
6.1 Einfahrgeschwindigkeiten	98
6.2 Bilder Messtechnik	101
6.3 Toleranzberechnung Fehlerband ideale Bremskraftverteilung über eine Schwerpunktbestimmung am Versuchsmotorrad	104
6.3.1 Zusammenfassung	104
6.3.2 Ausführliche Beschreibung	105
7 Literaturverzeichnis	108
8 Betreute studentische Arbeiten	120

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben – Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung
ABS	Anti-Blockier-System (Automatischer Blockierverhinderer)
BKV	Bremskraftverteilung
CBS	Combined Braking System (Kombinationsbremssystem)
EA	elektrische Aktivität
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyogramm
FZD	Fachgebiet Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt, Leiter Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
IAD	Fachgebiet Arbeitswissenschaft an der Technischen Universität Darmstadt, Leiter Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
m.	mit
med.	Median
o.	ohne
S	Schwerpunkt
TP	Testperson

Lateinische Buchstaben – Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
$a_{v95} \dots a_{v75}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Teilbeschleunigungen aus 95% bis 75% der Ausgangsgeschwindigkeit
b	%	Abbremsung
F	N	Kraft
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
G	N	Gewichtskraft
m	kg	Masse
t	s	Zeit
v	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit
x		Hauptachse des Motorrads in Fahrtrichtung
y		Hauptachse des Motorrads senkrecht zur Mittenebene nach links
z		Hauptachse des Motorrads nach oben

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
φ	°, rad	Drehwinkel
μ	./.	Reibbeiwert
θ	kgm ²	Massenträgheitsmoment

Indizes

Zeichen	Bezeichnung
<i>0</i>	Nullstellung, Startposition
<i>1</i>	Zum aktuellen Zeitpunkt
<i>B</i>	Brems-
<i>einl</i>	Einleitungsphase
<i>ges</i>	gesamt
<i>gier</i>	um die Fahrzeug-z-Achse drehend, gier-
<i>h</i>	hinten
<i>längs</i>	In Längsrichtung, längs-
<i>max</i>	maximal
<i>quer</i>	In Querrichtung, quer-
<i>R</i>	Reib-
<i>res</i>	resultierend
<i>roll</i>	um die Fahrzeug-x-Achse drehend, roll-
<i>S</i>	Seiten-
<i>v</i>	vorne
<i>voll</i>	Vollbremsphase
<i>v95 ... v75</i>	Vollbremsphase aus 95 % ... 75 % der Ausgangsgeschwindigkeit
<i>x</i>	Wegpunkt
φ	f(φ)

Zusammenfassung

Die Bremsung von Einspurfahrzeugen birgt die Gefahr der Vorderradüberbremsung. Bei der Vorderradüberbremsung fallen sowohl die stabilisierenden Kreiselkräfte als auch die Seitenführungskräfte mit der Blockade des Vorderrads weg. Ohne Aufhebung der Blockade kommt es zum Sturz. Die Folgen für den oder die Aufsassen eines solchen Sturzes sind bei motorisierten Zweirädern und hier insbesondere bei den Motorrädern aufgrund der im Verkehr realisierten Geschwindigkeiten besonders schwerwiegend. Automatische Blockierverhinderer (ABS) können eine Radblockade und somit den daraus resultierenden Sturz verhindern. In bisherigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass Motorradfahrer in Abhängigkeit von ihrer Fahrerfahrung und dem Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn mit ABS sturzsicher gleiche oder bessere Bremsleistungen erzielen können als ohne das technische Hilfsmittel ABS. In der vorliegenden Arbeit wird über die Betrachtung des Ergebnisses der Bremsleistung hinaus die Beanspruchung des Fahrers beim Bremsen mit verschiedenen Bremssystemen untersucht. Bei gleicher Bremsleistung sind die psychische und physische Beanspruchung des Fahrers Indikatoren für mögliche weitere Tätigkeiten des Fahrers während einer Gefahrenbremsung wie die Entwicklung alternativer Unfallvermeidungs- oder Unfallfolgenabmilderungsstrategien und deren mögliche Umsetzung parallel oder sukzessive zum Bremsvorgang.

Zur Untersuchung der psychischen und physischen Beanspruchung von Motorradfahrern wurden Versuchsaufbauten konzipiert, die unter Berücksichtigung der Sicherheit der Testpersonen einen Vergleich bei der Bremsung mit verschiedenen Motorradbremssystemen gestatten. Dazu wurden aus dem realen Verkehrsgeschehen entnommene Bremsaufgaben gestellt wie Geradeausbremsungen aus 60 km/h und aus 90 km/h sowie eine Kurvenbremsung aus 50 km/h mit einer über den Kurvenradius vorgegebenen Querbeschleunigung von unter 4 m/s^2 . Die Versuche fanden stets auf einer mit Wasser benetzten Zementbetonfahrbahn statt. Ein Versuchsfahrzeug wurde ausgestattet mit einem von Standardbremsanlage auf Kombinationsbremsanlage umschaltbaren Bremssystem mit abschaltbarem ABS und einem abnehmbaren Fußbremshebel. Im Versuchsablauf folgten die fünf Bremssysteme zur Vermeidung von Artefakten in drei Permutationsreihenfolgen aufeinander. Zur Darstellung der Sturzgefahr durch die Vorderradüberbremsung, ohne die Versuchsfahrer den potenziell gesundheitlich nachteiligen Folgen eines Sturzes auszusetzen, wurde eine Umsturzsicherung an dem Versuchsfahrzeug angebracht. Die Umsturzvorrichtung begrenzt den Rollwinkel derart, dass es nicht zum Sturz kommt, sondern nur zu einer Anlage des Motorrads an die Vorrichtung. Über einen auf die Versuche abgestimmten Fragebogen wurden die physischen und psychischen Voraussetzungen des Fahrers sowie seine aktuelle Befindlichkeit vor, während und nach den Versuchen ermittelt. Die Fahrer mit Fahrerfahrungen zwischen 18.000 km und 200.000 km wurden aus der Risikogruppe der jungen Männer zwischen 20 Jahren und 35 Jahren ausgewählt und mit physiologischer Messtechnik ausgestattet. Dazu zählen die Erfassung der Herz-

schlagfrequenz und die Aufnahme der Elektromyogramme (EMG) des Trapezmuskels und des Hauptschließmuskels der linken Hand. Die Herzschlagfrequenz ist ein Indikator für die physische und die psychische Beanspruchung des Fahrers durch die Versuchsaufgabe, die aus dem EMG abgeleitete elektrische Aktivität ist Indikator für die physische Beanspruchung.

Durch die Versuche konnte bestätigt werden, dass auch bei erfahrenen Motorradfahrern die mit ABS erzielten Bremswege kürzer sind als die ohne ABS erzielten. Dies ist vor allem auf die Anfangsphase einer Bremsung zurückzuführen, in der ohne ABS beim Herantasten an die maximal mögliche Verzögerung mehr Zeit verstreicht als bei Bremsungen mit ABS. Bei Bremsungen mit ABS wird der Motorradfahrer physisch geringer beansprucht als bei Bremsungen ohne ABS. Dies ist unabhängig von der Fahrerfahrung des Fahrers. Da die physische Belastung bei Bremsungen ohne ABS gleich oder geringer ist als bei Bremsungen mit ABS, lässt sich die höhere physische Beanspruchung auf eine körperliche Reaktion auf psychische Beanspruchung zurückführen.

Bei der Bremsung mit blockiergesicherten Bremsen konnte kein signifikanter Unterschied in der Bremsleistung oder den physiologischen Beanspruchungsgrößen mit Standard- oder Kombinationsbremssystem festgestellt werden. Bremswege mit dem Kombinationsbremssystem ohne ABS sind tendenziell geringer als die mit dem Standardbremssystem von den Testpersonen erzielten Bremswege. Die Beanspruchung des Fahrers bei Bremsungen mit einem Kombinationsbremssystem unterscheidet sich nicht signifikant von der Beanspruchung der Testpersonen bei Bremsungen mit dem Standardbremssystem.

Die mit ABS erzielten Bremswege sind nicht unabhängig von der Fahrerfahrung. Fahrer mit höherer Fahrerfahrung konnten ohne ABS bei Fahraufgaben mit geringerer psychischer Belastung teilweise höhere Bremsverzögerungen erzielen als Fahrer mit geringer Fahrerfahrung mit ABS. Fahrer mit höherer Fahrerfahrung erzielen mit ABS höhere Verzögerungen als Fahrer mit geringerer Fahrerfahrung mit ABS.

Es konnte nicht bestätigt werden, dass bei der Bedienung eines blockiergesicherten Kombinationsbremssystems mit nur dem Handhebel die erzielten Bremswege länger sind als bei der Bedienung mit zwei Betätigungselementen.

Die Umsturzvorrichtung kam erwartungsgemäß nur bei Bremsungen ohne ABS zum Eingriff. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine vorangegangene Vorderradblockade in keinem der Fälle länger als 0,2 s bis zum Eingriff der Umsturzvorrichtung, der gleichzusetzen ist mit einem Sturz im realen Verkehrsgeschehen, gedauert hat. Diese Dauer liegt unter den allgemein für Reaktionszeiten von Verkehrsteilnehmern angenommenen Zeiten.

Die geringsten durch die Fahrer realisierten Verzögerungen fanden bei der Kurvenbremsung statt. Bremsungen ohne ABS erreichten ein Verzögerungsniveau, wie es bereits vom Motorschleppmoment des Versuchsfahrzeugs aufgebracht werden kann.

Die Art des Bremssystems und der zeitliche Fortschritt der Fahrversuche hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Befindlichkeit der Testpersonen.

Es konnte somit dargelegt werden, dass auch erfahrene Motorradfahrer nicht nur bessere Bremsleistungen mit ABS erzielen als ohne Blockierverhinderer, sondern dass auch die psychische Beanspruchung der Fahrer bei Bremsungen mit ABS signifikant geringer ist als ohne. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Bedienung eines blockiergesicherten Kombinationsbremssystems nur mit dem Handbremshebel gegenüber der Bedienung mit zwei Bremshebeln sowohl bezüglich der Bremsleistung als auch im Hinblick auf die psychische Beanspruchung der Testpersonen nicht nachteilig ist.

1 Einleitung

Die Sicherheit des Motorradfahrens in Deutschland konnte seit der Wiedervereinigung und der damit einhergehenden Zusammenlegung der Statistiken von Ost und West nicht mit der Entwicklung der an den Verkehrsofferzahlen messbaren Sicherheit anderer Verkehrsmittel Schritt halten. Die jeweils auf den Beobachtungszeitraum von einem Kalenderjahr bezogenen Verkehrsofferzahlen für getötete und verletzte Motorradfahrer stagnieren im Rahmen der Witterungsabhängigkeit seit ca. 15 Jahren, wohingegen die absoluten und bestandsbezogenen Verkehrsofferzahlen für andere Verkehrsteilnehmer, hier sind vor allem die Fahrer und Mitfahrer von PKW zu nennen, seitdem stetig gesunken sind. 1991, dem ersten Jahr nach der Wiedervereinigung und damit einhergehend der ersten gesamtdeutschen Unfallstatistik, wurden bei Straßenverkehrsunfällen noch 6.801 Pkw-Fahrer und 992 Motorradfahrer tödlich verletzt; 2004 betrug die Anzahl der im Straßenverkehr tödlich verletzten Pkw-Fahrer mit 3.238 weniger als die Hälfte, wohingegen noch 858 Motorradfahrer tödlich verletzt wurden – eine auch witterungsabhängige Zahl, die im Vorjahr noch bei 946 lag.

Ein Grund für die auseinander klappende Sicherheitsschere zwischen Motorrädern und PKW sind die großen Fortschritte in der aktiven und passiven Sicherheit von PKW, die seit den Neunziger Jahren gemacht wurden. Neben einer Verbesserung der Fahrbarkeit von Motorrädern findet das ABS trotz des vielfach nachgewiesenen Fortschritts in der aktiven und passiven Sicherheit des Motorradfahrens nur langsam Verbreitung. Zusammen mit der wesentlich längeren Produktlebenszeit eines Motorrads gegenüber der eines Pkw wird es dadurch auch in Zukunft nur schleppend zu einer Bestandsdurchdringung kommen.

Tabelle 1 beschreibt wichtige Stationen auf dem Weg zu den heute aktuellen Motorradbremsystemen Kombibremse und ABS.

Die Einführung der Scheibenbremse schafft durch die Unabhängigkeit der inneren Bremskraftverstärkung vom Reibbeiwert zwischen Bremsbelag und Reibfläche die Grundlage für eine feinfühligere Dosierung der Bremse durch den Fahrer¹ und erleichtert die Bremsmomentregelung. Die Telelever-Vorderradführung ermöglicht durch den hohen kinematischen Bremsnickausgleich den Aufbau großer Verzögerungsgradienten zu Beginn der Bremsung und durch die konstruktive Trennung von Längs- und Quersteifigkeit der Vorderradführung eine den ABS-induzierten Radlängsschwingungen angepasste Steifigkeit der Vorderradführung in Richtung der Fahrzeug-x-Achse².

¹ Bönsch 1985: Fortschrittliche Motorradtechnik, S. 261

² Stoffregen 1999: Motorradtechnik, S. 263

Tabelle 1: ABS und Kombibremse – historische Stationen

1903	Kombinationsbremsanlage beim Pkw (Mercedes „Allradbremse“) ³
1969	Scheibenbremse serienmäßig (Honda CB 750 four) ⁴
1975	Kombinationsbremsanlage serienmäßig (Moto Guzzi 750 S3 und T3 California) ⁵
1978	ABS beim Pkw (Mercedes-Benz SL) ⁶
1984	ABS serienmäßig (Lincoln Mk II) ⁷
1988	ABS (BMW K 100 LT, ABS I) ⁸
1993	Längslenkergeführte Telegabel (BMW R 1100 RS, Telelever) ⁹
1995	ABS serienmäßig (BMW R 1100 RT) ¹⁰
1996	Kombinationsbremsanlage mit ABS (Honda ST 1100) ¹¹
2000	Kombinationsbremsanlage mit ABS und Hilfsbremskraft (BMW K 1200 LT) ¹²
2001	Gesamte Modellpalette eines Herstellers mit ABS lieferbar (BMW) ¹³
2002	Kombinationsbremsanlage mit blockiergeschütztem Vorderrad (Peugeot Elystar)
2006	ABS mit elektrisch angesteuerter Kombinationsbremsanlage mit hydraulischer Bremskraftverstärkung des Hinterradbremskreises (BMW F800 und R1200S) ¹⁴

1.1 Motivation

Vor dem Hintergrund der stagnierenden Verkehrsofferzahlen von Motorradfahrern und ihres damit steigenden Anteils an der Gesamtheit der Verkehrsoffer sind die Ursachen für Motorradunfälle und deren mögliche Vermeidung von steigender Bedeutung für die gesamte Unfallstatistik. Ca. 20 % aller in Deutschland erfassten Unfälle mit Beteiligung eines oder mehrerer

³ Buckley et al. 2000: Auto, S. 32

⁴ Honda Presse 1998: 30 Jahre CB 750 four, S. 11

⁵ Colombo 1989: Moto Guzzi, S. 121

⁶ Bosch 2005: Produktgeschichte

⁷ ContiTeves 2004: 20 Jahre ABS

⁸ Stoffregen 1999: Motorradtechnik, S. 333

⁹ BMW Motorrad 1993: BMW R1100RS

¹⁰ BMW Motorrad 1995: BMW R1100RT

¹¹ Honda 1996: CBS-ABS with TCS

¹² Braunsperger et al. 2001: Das neue Integral ABS

¹³ BMW 2000: Motorrad Programm 2001

¹⁴ Hoffmann et al. 2006: MIB - ein fortschrittliches Bremssystem

Motorräder sind Alleinunfälle, in 25 % der Unfälle ist der Motorradfahrer der Hauptbeschuldigte, in 54 % der Unfälle ist ein Pkw-Fahrer der Hauptbeschuldigte des Unfalls¹⁵. Im Vorfeld eines Unfalls kam es in ca. 1/3 aller Unfälle zu keiner Handlung des Motorradfahrers mehr, in 36 % der 437 untersuchten Unfälle leitete der Fahrer eine Bremsung ein, in 13 % der Fälle wurde im Vorfeld eine Kombination aus Bremsen und Ausweichen realisiert, und in 14 % führte der Motorradfahrer unmittelbar vor der Kollision ein Ausweichmanöver durch¹⁶. In etwa der Hälfte aller Unfälle gehörte die Bremsung zur präakzidentiellen Handlung des Motorradfahrers. Von der Güte dieser Bremsung, das heißt der Minimierung der mit der Wahrnehmung beginnenden Aneinanderkettung von Zeit- respektive Weganteilen über dem Anhalteweg zur Erzielung möglichst geringer Aufprallenergien bei gleichzeitig über einen ungestürzten Zustand kontrollierbaren Unfallablauf, hängt die zu prognostizierende Verletzungsschwere des Motorradfahrers ab¹⁷. Es gilt, dem Motorradfahrer ein geeignetes Werkzeug – in diesem Fall ein Bremssystem – an die Hand zu geben, das ihm die Erzielung hoher Verzögerungen, gemessen ab der ersten Wahrnehmung der Gefahrensituation, sowohl physikalisch/technisch als auch von seiner psychischen Konditionierung her ermöglicht. Diese Arbeit trägt mit arbeitswissenschaftlichen und fahrzeugtechnischen Untersuchungen dazu bei, Kriterien für ein solches Bremssystem zu identifizieren und das Bremsverhalten des Systems Fahrer und Motorrad danach zu bewerten.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 ABS

Bei Motorrädern findet der automatische Blockierverhinderer – in dieser Arbeit mit dem nicht mehr nur umgangssprachlich verwendeten Kürzel ABS für Anti-Blockier-System bezeichnet – mehr und mehr Verbreitung. Der Markt in den 1990er Jahren erfuhr eine Zweiteilung der Systeme in einfache Magnetventillösungen (Honda bis 1996, Suzuki, Yamaha) und aufwändigere Plungersysteme (BMW, Honda seit 1996). Mit dem Jahrtausendwechsel kamen technisch sehr aufwändige Hilfskraftbremssysteme (BMW, Peugeot) hinzu und verbesserte Magnetventillösungen (BMW, Ducati), die in der Presse als einzig veröffentlichtem Vergleich zwischen den Bremssystemen zumindest in der maximal möglichen Bremsverzögerung als den technisch aufwändigeren Lösungen ebenbürtig bezeichnet werden¹⁸. Der Fortschritt in der Entwicklung des Pkw-ABS wurde auf das Motorrad übertragen, so dass die neueste Genera-

¹⁵ Assing 2000: Schwerpunkte der Unfälle von Motorradfahrern, S. 51

¹⁶ Kramlich 2000: Gefahrensituationen für Motorradfahrer, S. 161

¹⁷ Spörner et al. 2000: Aktive und passive Sicherheit bei Motorradkollisionen, S. 70

¹⁸ Schröter 2002: ABS im Vergleich, S. 22ff

tion der Anti-Blockier-Systeme mit stetig verstellbaren Kugelsitzventilen und Bremskraftunterstützung arbeitet, bei wesentlich kleinerem Bauraum, geringerer Systemmasse und niedrigeren Kosten (BMW). Im Gegensatz zum Pkw enthält das ABS üblicherweise einen Algorithmus (Ausnahme¹⁹: Ducati), der einen Bremsüberschlag verhindert. Dies wird durch eine Begrenzung der maximal möglichen Verzögerung erreicht²⁰ (Honda, Yamaha) oder durch eine Erkennung des abhebenden Hinterrads²¹ (BMW). Erstere und bei Standardbremssystemen auch letztere Art der Überschlagerkennung kann vom Fahrer im Missbrauchsfall umgangen werden. Bei Motorrollern gibt es Lösungsansätze, nach denen nur das Vorderrad blockiergesichert ist (Peugeot).

1.2.2 Kombinationsbremssystem

Bei Motorradbremssystemen wird nach der Anzahl der von einem Bedienelement mit Bremsdruck beaufschlagten Rädern unterschieden. Als Standardbremssystem wird beim Motorrad ein Bremssystem bezeichnet, bei welchem ein Handbremshebel die Vorderradbremse bedient und ein weiteres Bedienelement – bei Motorrädern in der Regel ein Fußbremshebel, bei Motorrollern meist ein weiterer Handbremshebel – die Hinterradbremse. Beim Einspurfahrzeug ist ein überbremstes Hinterrad fahrdynamisch weniger kritisch als ein überbremstes Vorderrad (vgl. Kapitel 2.5), weshalb ein Kombinationsbremssystem dem Fahrer vorzugsweise eine Überbremsung des Hinterrads ermöglichen sollte. Beim Standardbremssystem ist dem Fahrer die Einstellung der Bremskraftverteilung selbst überlassen. Die Kurve der idealen Bremskraftverteilung wird während der Bremsung meist nur für kurze Zeit und nur zufällig getroffen^{22,23}. Kombinationsbremssysteme haben als gemeinsamen technischen Hintergrund eine Einschränkung dieser beim Motorrad möglichen freien Verteilung der Bremskräfte von Vorder- und Hinterrad, s. Bild 1.

¹⁹ Schröter 2002: ABS im Vergleich, S. 22ff

²⁰ Schröter 2002: ABS im Vergleich, S. 22ff

²¹ Braunsperger et al. 2001: Integral ABS im Praxistest

²² Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 118ff

²³ Ecker et al. 2000: Bremsbeherrschung von Motorradfahrern, S. 165-168

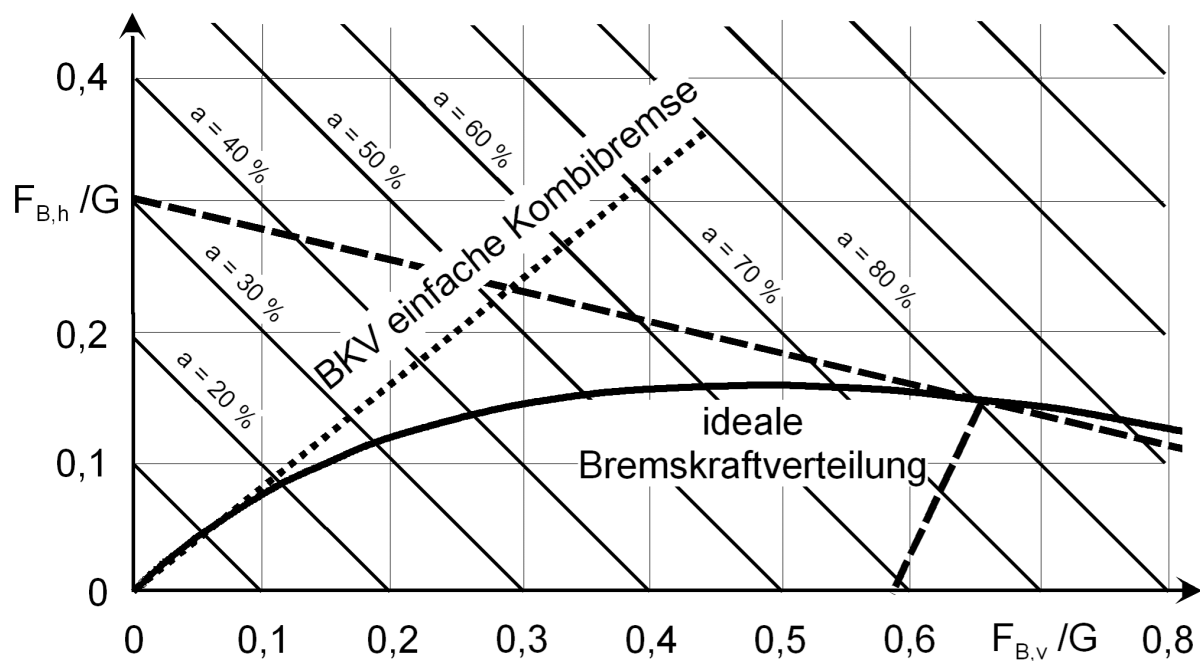


Bild 1: Bremskraftverteilung eines einfachen Kombinationsbremssystems in Übereinstimmung zu einem inzwischen überholten Richtlinienentwurf²⁴, nach dem für eine Abbremsung zwischen 15 % und 80 % zuerst das Hinterrad überbremst sein muss, wenn nicht die ideale Bremskraftverteilung realisierbar ist

Bei Kombinationsbremssystemen gibt es unterschiedliche Bedienkonzepte: Beim ältesten Kombinationsbremssystem (Moto Guzzi²⁵, später von Honda unter der Bezeichnung Single CBS verbaut) wird vom Handbremshebel nur eine der beiden Bremsscheiben der Vorderradbremse betätigt, und der Fußhebel betätigt die Hinterradbremse und die zweite Scheibe der Vorderradbremse. Zeichnet man eine mögliche Verteilung eines solchen Kombinationsbremssystems in ein Bremskraftverteilungsdiagramm, vgl. Bild 1, so zeigt sich an den höheren Werten für die Abbremsung bei unveränderter bezogener Hinterradbremskraft, dass auch diese einfache Form des Kombibremssystems unter dem Aspekt kürzerer möglicher Bremswege auch bei einer Fehlbedienung der Bremse in Form der nicht betätigten Vorderradbremse Vorteile gegenüber der Standardbremse aufweist.

Weitere Formen des Kombinationsbremssystems sind markenspezifisch. Die historisch nächste Entwicklung (vgl. Tabelle 1) ist das hydraulisch aufwändige Honda Dual CBS-System, welches bei einer Betätigung eines Bedienelements grundsätzlich beide Bremsen betätigt. Bei der Betätigung des Handbremshebels wird das Vorderrad überbremst, bei der Betätigung des Fußbremshebels das Hinterrad. Die Darstellung im Bremskraftverteilungsdiagramm zeigt Bild 2.

²⁴ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 7

²⁵ Colombo 1989: Moto Guzzi, S. 121

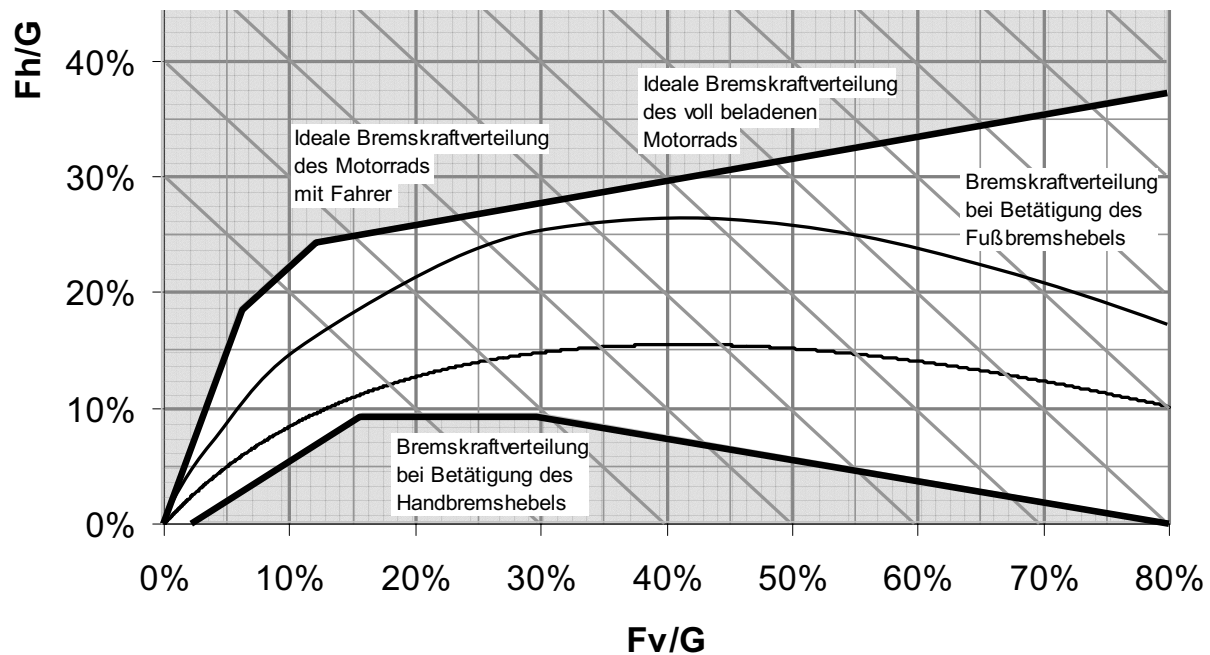


Bild 2: Darstellung einer idealen Bremskraftverteilung eines Motorrads mit Fahrer und mit den qualitativen, bei der Betätigung eines komplexen Kombinationsbremssystems (Honda Dual-CBS) ausschließlich mit dem Hand- bzw. dem Fußbremshebel installierten Bremskraftverteilungen; die grau hinterlegten, zur Erzielung eines kurzen Bremswegs nicht sinnvollen Bereiche der Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrad können mit diesem Kombinationsbremssystem nicht eingestellt werden

Das Kombinationsbremssystem von BMW hat eine elektronische Bremskraftverteilung, die nach der ersten ABS-Regelung unabhängig vom Betätigungselement die aktuelle ideale Bremskraftverteilungskurve einstellt. Bei dem unter der Verkaufsbezeichnung Teil-Integral-System vertriebenen System ist nur der Handbremshebel an das Kombinationsbremssystem angeschlossen, der Fußbremshebel betätigt nur die Hinterradbremse²⁶.

Die jüngste Form der Kombinationsbremsanlage ist eine blockiergesicherte Standardbremsanlage ohne hydraulischen Durchgriff zwischen den zwei Bremskreisen, bei der der nicht oder in Bezug auf die ideale Bremskraftverteilung zu schwach betätigte Hinterradbremskreis über eine elektronisch angesteuerte Hydraulikpumpe mit der zur Erlangung der idealen Bremskraftverteilung fehlenden Druckdifferenz beaufschlagt wird. Bei der Betrachtung des Gesamtsystems Fahrer/Motorrad/Fahrbahn handelt es sich also um eine Bremskraftunterstützung, bei der Nichtbetätigung eines Bremskreises und der Ziehung der Systemgrenzen um die einzelnen Bremskreise ist der nicht betätigte Bremskreis über Brake-by-Wire fremdkraftbetätigt²⁷.

Eine weitere Form der Kombinationsbremsanlage wird bislang ausschließlich in Verbindung mit einem blockiergesicherten Vorderrad im Rollersegment angeboten: Ein Handbremshebel

²⁶ Braunsperger et al. 2001: Das neue Integral ABS

²⁷ Hoffmann et al. 2006: MIB - ein fortschrittliches Bremssystem

bedient das Vorderrad und das Hinterrad, wobei das Vorderrad bei niedrigen bis mittleren Verzögerungen überbremst ausgelegt ist und vor der Blockade des Hinterrads in die ABS-Regelung läuft. Bei höheren Verzögerungen blockiert das Hinterrad vor dem Vorderrad. Das zweite, ebenfalls als Handbremshebel ausgelegte Bedienelement wirkt nur auf das Hinterrad²⁸.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass im Gegensatz zum Pkw, bei dem die Kombinationsbremse 1903 als sogenannte Allradbremse eingeführt und seit den 1920er Jahren Stand der Technik ist, die Bremskraftverteilung beim Motorrad noch nicht vereinheitlicht ist. Dies bedeutet für den Fahrer motorisierter Zweiräder, dass er sich viel stärker als beim Pkw vor der Fahrt über die genaue Funktionsweise seines Bremssystems in Kenntnis setzen und seine Handlungsweise dahingehend anpassen muss.

1.2.3 Gesetzgeberische Aspekte

Die aktuell gültige Gesetzgebung zum Thema Motorradbremsen ist in der EU-Richtlinie 93/14/EWG²⁹ festgelegt: Motorradbremsen müssen unter Einhaltung maximaler Bedienkräfte folgende Anforderungen erfüllen:

- Zwei voneinander unabhängige Bedienelemente für zwei voneinander unabhängige Betriebsbremsanlagen, wobei mindestens die eine auf das Vorderrad und die andere auf das Hinterrad wirkt,
- Gewährleistung einer mittleren Vollverzögerung mit beiden Bremsen von mindestens $5,8 \text{ m/s}^2$ in beladenem Zustand,
- Gewährleistung einer mittleren Vollverzögerung von mindestens $4,4 \text{ m/s}^2$ bei Betätigung nur der Vorderradbremse bzw. $2,9 \text{ m/s}^2$ mit der Hinterradbremse jeweils in beladenem Zustand,
- bei einer Betätigung der feuchten Bremsen mit der Betätigungskraft, die bei trockenen Bremsen notwendig ist, um eine Verzögerung von $2,5 \text{ m/s}^2$ zu gewährleisten, müssen zwischen $0,5 \text{ s}$ bis $1,5 \text{ s}$ nach Betätigungsbeginn mindestens 60% der mit trockenen Bremsen erreichten mittleren Verzögerung erzielt werden,
- bei Vorhandensein einer Kombibremse muss mit einer Betätigungseinrichtung eine mittlere Vollverzögerung von $5,1 \text{ m/s}^2$ erreichbar sein, mit der anderen Betätigungseinrichtung $2,5 \text{ m/s}^2$ jeweils im unbeladenen und voll beladenen Zustand,
- die zur Erzielung der Mindestverzögerungen notwendige Handkraft darf dabei 200 N nicht übersteigen, die notwendige Fußkraft ist auf 350 N begrenzt, und die Betätigungskraft einer – soweit vorhandenen – Feststellbremse darf 400 N nicht übersteigen.

Den Ausfall einer Hilfs- oder Fremdkraft sieht diese Richtlinie nicht vor.

²⁸ FTE Automotive: CORA

²⁹ FAKRA-Handbuch Kraftfahrzeugbau

Die Anforderungen an einen eventuellen Blockierverhinderer der Bremsen sind ebenfalls in der 93/14/EWG in der Anlage 2 festgeschrieben. Danach gilt für eine blockiergeschützte Bremse, dass im Fall einer ABS-Regelung 70% der vom Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn her möglichen Verzögerung erreicht werden muss. Bei Ausfall des ABS gilt in Anlehnung an Anlage 1 eine Mindestverzögerung von $2,9 \text{ m/s}^2$.

Weitere Vorschriften spielen in die Gestaltung der Bremsanlage hinein, wie beispielsweise die Richtlinie 97/24/EG Kap. 3 Anh. I 6.2, nach der das Ende eines Bremshebels einen Abrundungsradius von mindestens 7 mm aufweisen muss. Die mechanische Auslegung der Bedieneinrichtungen hinsichtlich der Festigkeit wird dem Hersteller überlassen in Anlehnung an die Pkw-Bremsenrichtlinie 71/320/EWG.

In der gesetzgeberischen Diskussion befindet sich eine weltweit einheitliche Regelung, die vor allem Elemente aus der ECE-Richtlinie 78 und der US-amerikanischen FMVSS 122 enthält. Unterschiede zur bestehenden ECE-Richtlinie sind Vorschriften bezüglich Schlamm- und Wasserdurchfahrten sowie Kontrollanzeigen in Anlehnung an FMVSS 122.

1.3 Stand der Forschung

Die Motorradbremsung wird seit Ende der 1970er Jahre erforscht³⁰. Der Fokus lag dabei auf der Ermittlung der Bremskraftverteilung und den Bremsverzögerungen bei Bremsungen mit Standard- und Kombinationsbremssystemen. Erst später wurden Versuche mit ABS am Motorrad durchgeführt³¹. Weideles umfangreiche Arbeiten über die Motorradbremsung aus Geradeaus- und Kurvenfahrt, mit und ohne ABS, auf nasser und trockener Fahrbahn mit Fahrern unterschiedlicher Fahrerfahrung behandeln die möglichen Verzögerungen von Motorrädern und belegen den starken Fahrereinfluss, dem die theoretisch erreichbaren Werte in der Praxis auf abgesperrter Versuchsstrecke unterliegen. In seiner Dissertation³² behandelt Weidele die Theorie der Motorradbremsung in Geradeaus- und Kurvenfahrt ausführlich, so dass an dieser Stelle darauf verwiesen sei. Das bei Weideles Versuchen verwendete Prototyp-ABS regelte, verglichen mit aktuellen Systemen, mit langen Regelzyklen, so dass erfahrene Versuchsfahrer auch auf nasser Fahrbahn bei einer Kurvenbremsung ohne ABS durchschnittlich kürzere Bremswege erzielen konnten als mit ABS. Bei ABS-geregelten Bremsungen in der Kurve traten große bremsmomentinduzierte Lenkmomentschwankungen auf. Weidele schlug daher zur Verbesserung des Bremsverhaltens in der Kurve den Einsatz eines Bremslenkmomentverhinderers vor, der den Reifenaufstandspunkt stets in der Nähe der Fahrzeugmittebene hält. Fortschritte in der Regelgüte von ABS³³ und verbesserte Karkassaufbauten von

³⁰ Ervin 1977: Motorcycle Braking Performance

³¹ Weidele et al. 1987: Kombibremsen und ABV

³² Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung

³³ Braunsperger et al. 2001: Das neue Integral ABS

Motorrad-Vorderreifen³⁴ lassen eine solche Forderung nicht mehr vordringlich erscheinen. Weiterhin empfiehlt Weidele aufgrund seiner Versuchsergebnisse die flächendeckende Ausstattung von Motorrädern mit ABS. Die theoretische Beschreibung der dynamischen Vorderadüberbremsung, die bei sogenannten Schreck- oder Panikbremsungen auftritt und meist unweigerlich zum Sturz führt³⁵, unterstützt diese Empfehlung nachdrücklich und regt Versuche im öffentlichen Straßenverkehr an.

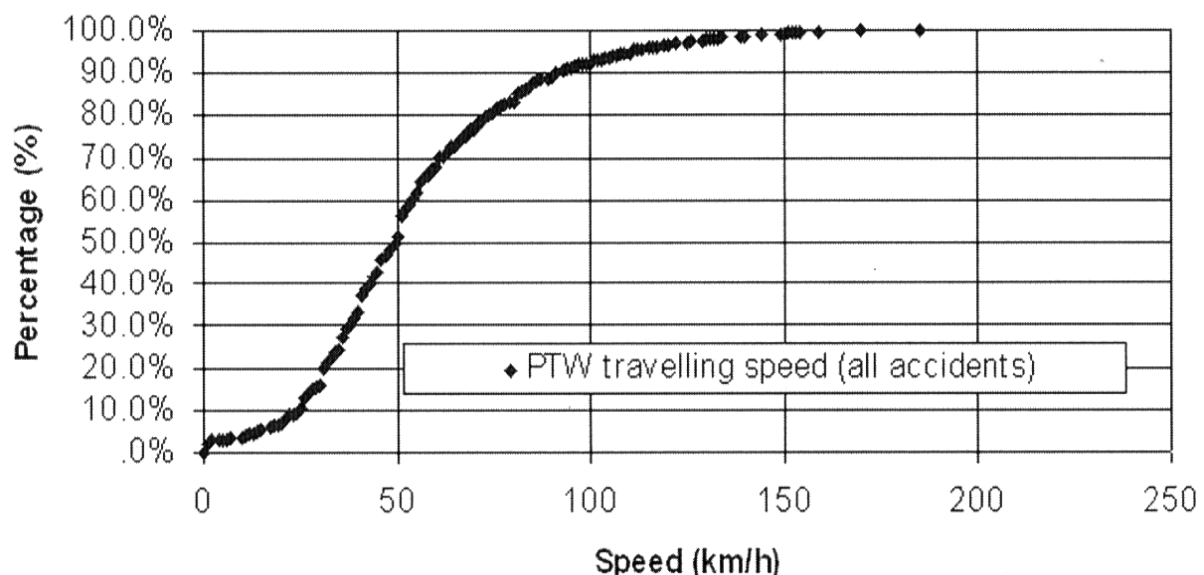


Bild 3: Summenkurve der Geschwindigkeiten von Motorrädern zum Zeitpunkt des herbeiführenden Ereignisses; in 50 % aller Motorradunfälle, 37 % aller Alleinunfälle und 19,4 % aller Unfälle mit tödlichem Ausgang fuhr das Motorrad weniger als 50 km/h³⁶

Präckel hat in sehr umfangreichen Fahrversuchen kritische Fahrsituationen mit dem Schwerpunkt Bremssituationen von Motorradfahrern im realen Straßenverkehr untersucht. Dabei wurde das Fahrverhalten von Motorradfahrern mit und ohne ABS verglichen und festgestellt, dass sich das Fahrverhalten von Motorradfahrern bezüglich der mittleren Geschwindigkeiten und Verzögerungen auf Motorrädern mit ABS nicht von dem auf Motorrädern ohne ABS unterscheidet³⁷. Dies ist ein wichtiger Unterschied zwischen Motorradfahrern und Pkw-Fahrern, bei denen es beim Fahren von Pkw mit ABS zu einer Verhaltensanpassung an die erhöhte subjektive Sicherheit durch das ABS kam^{38,39}. Präckel empfiehlt eine weitere Verbreitung von

³⁴ Casper et al. 1998: Modern Motorcycle Tyres

³⁵ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 36ff

³⁶ Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In Depth Accident Study, S. 45

³⁷ Präckel 1996: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS, S. 30f

³⁸ Aschenbrenner et al. 1992: Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems

³⁹ Kullgren et al. 1994: Effectiveness of ABS

Kombinationsbremsanlagen und ABS sowie Kombinationen daraus und eine Weiterentwicklung von ABS hinsichtlich der Kurvenbremstauglichkeit.

Eine europäische In-Depth-Studie zeigt unter anderem, dass der überwiegende Teil von Motorradunfällen bei niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten stattfindet⁴⁰: Der Median der Ausgangsgeschwindigkeiten der motorisierten Zweiräder vor einem Unfall beträgt im Erfassungszeitraum 1999/2000 nur 50 km/h. 90 % der Unfälle finden bei Ausgangsgeschwindigkeiten des motorisierten Zweirads von unter 90 km/h statt, s. Bild 3.

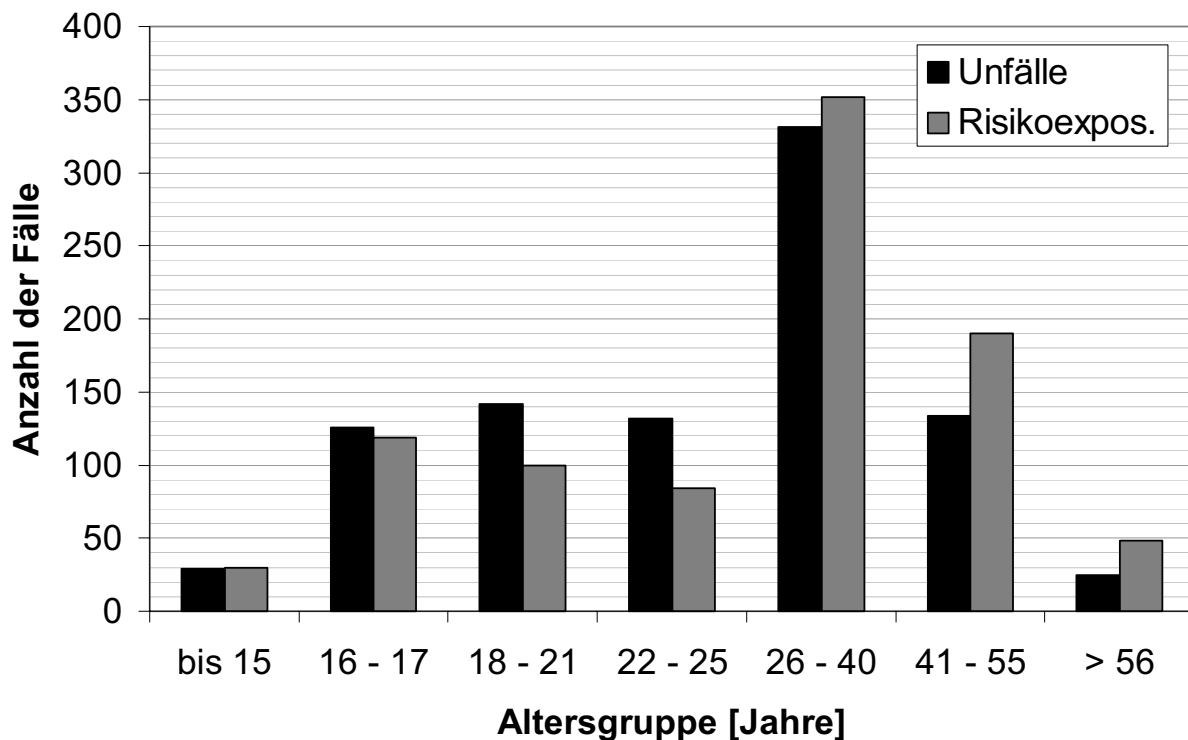


Bild 4: Altersbezogenes Risiko zu verunglücken und Risikoexposition als bestandsbasiert extrapolierte Anzahl der altersbezogenen Unfallzahlen in Europa⁴¹

In 7,9 % der untersuchten Unfälle mit Motorradbeteiligung war die Straße mit Wasser benetzt, in fast 85 % aller Fälle trocken. Da die Verkehrsverteilung in Abhängigkeit vom Straßenzustand nicht angegeben ist, kann daraus kein spezifisches Gefahrenpotenzial abgeleitet werden. Der größte Teil der nach einer in den Jahren 1999 bis 2000 durchgeführten europäischen In-Depth-Studie verunglückten Motorradfahrer ist 26 bis 45 Jahre alt, das größte Gefährdungspotenzial haben jedoch Fahrer zwischen 18 und 25 Jahren, s. Bild 4. Auch hier fehlt zur Einordnung des Risikopotentials die Information über die Jahresfahrleistungen der Altersgruppen.

⁴⁰ Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In Depth Accident Study, S. 45

⁴¹ Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In Depth Accident Study, S. 47

In Deutschland ist das Bild ähnlich; Fahrer bis zu 25 Jahren sind bestandsbezogen einem überdurchschnittlichen Risiko ausgesetzt, mit tödlichen Folgen zu verunfallen, Fahrer zwischen 26 und 35 Jahren einem durchschnittlichen Risiko, s. Bild 5.

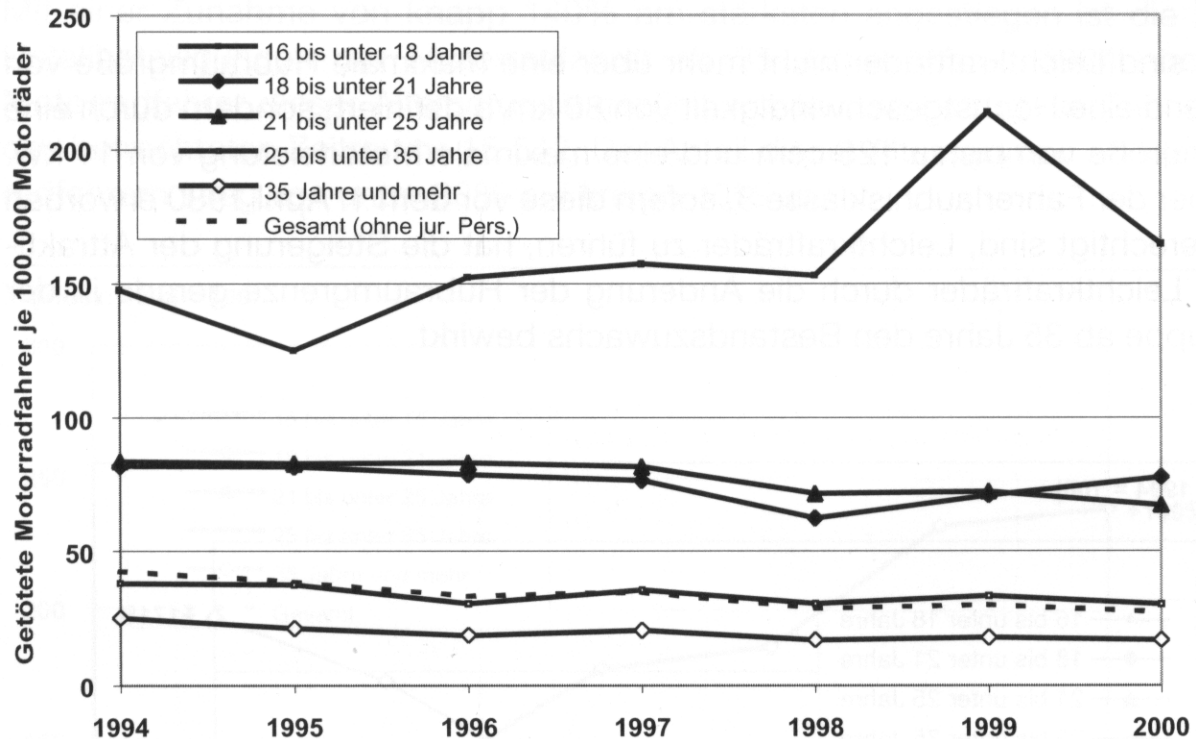


Bild 5: Bestandsbezogenes Risiko, in Deutschland als Motorradfahrer tödlich zu verunglücken⁴²

Der Fahrereinfluss auf die maximal erzielte Bremsverzögerung ist beim Motorrad deutlich größer als bei anderen Kraftfahrzeugen. Ein maßgeblicher Einflussfaktor ist die Fahrerfahrung des Motorradfahrers. Mit zunehmender Fahrerfahrung, gemessen an der Gesamtfahrerfahrung im Laufe eines Fahrerlebens, steigen die erreichten Bremsverzögerungen auf abgesperrter Versuchsstrecke sowohl mit ABS als auch ohne an⁴³. Im Rahmen von Bremsversuchen ohne ABS kam es durch eine Art Wettbewerbssituation zwischen sehr erfahrenen Motorradfahrern zu Stürzen durch Vorderradblockaden und im Anschluss an die Stürze – mutmaßlich aus Angst vor einer weiteren Blockade des Vorderrads – zu nur durchschnittlichen Bremsverzögerungen in der Gruppe der sehr erfahrenen Motorradfahrer⁴⁴.

Weiterhin ist die erzielte Bremsverzögerung eines Motorradfahrers in starkem Maße von der von seiner Umwelt ausgehenden Belastung und der damit für ihn einhergehenden Beanspruchung abhängig. So können im realen Verkehrsgeschehen Fehlbedienungen der Bremse beob-

⁴² Assing 2000: Schwerpunkte der Unfälle von Motorradfahrern, S. 50

⁴³ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 117

⁴⁴ Post et al. 1984: Kombibremse Motorrad, S. 30

achtet werden, wie sie bei Versuchen auf abgesperrter Teststrecke nicht vorkommen. Beispiele hierfür sind die synchrone und damit technisch widersinnige Betätigung der beiden Bedieneinrichtungen⁴⁵ und die alleinige Betätigung der Hinterradbremse⁴⁶. Grund hierfür ist die Begrenztheit der menschlichen Sensorik: Der Mensch verfügt zwar über die Fähigkeit zur unabhängigen Steuerung aller Extremitäten gleichzeitig (spielen von Musikinstrumenten, bspw. Orgel), jedoch verfügt er nur über geringe sensorische Kapazitäten, die nur die Rückführung der Tätigkeit einer Extremität zulässt⁴⁷.

Die Gefahr einer dynamischen Vorderradüberbremsung ist technisch bedingt (vgl. Kapitel 3.2.1) und kommt sowohl im realen Verkehrsgeschehen als auch im Versuchsbetrieb als Unfallursache zum Tragen⁴⁸. Sollte die Überbremsung des Vorderrads nicht unweigerlich zum Sturz führen, so bedeutet sie doch eine Verlängerung des Bremswegs, da die Bremse zunächst wieder geöffnet, das Fahrzeug stabilisiert und von neuem mit der Bremsung begonnen werden muss. Angesichts des großen Anteils der Vorfahrtsverletzungen und der Fehler beim Wenden durch Pkw-Fahrer an der Gesamtheit der Unfälle mit Motorradbeteiligung⁴⁹ ist besonders für den Motorradfahrer die sichere Erreichbarkeit hoher Verzögerungen und somit kurzer Bremswege lebenswichtig. Sollte es dennoch zu einer Kollision zwischen Motorrad und Pkw kommen, so sollte das Motorrad zum Kollisionszeitpunkt noch aufrecht fahren, da nur so kontrollierte Unfallabläufe gewährleistet werden können, die beispielsweise dem Fahrer eine Gelegenheit zum Überfliegen des Hindernisses geben und unabdingbar sind für zukünftige Systeme zur Erhöhung der passiven Sicherheit wie zum Beispiel der Airbag⁵⁰. ABS beim Motorrad kommt also eine wichtige Rolle nicht nur bei der aktiven (Unfall vermeidenden), sondern auch bei der passiven (Unfallfolgen abmildernden) Sicherheit zu und bietet die Grundlage für weiter führende Sicherheitssysteme.

Arbeitswissenschaftlich wurde das Motorradfahren nur vereinzelt betrachtet, meist im Zusammenhang mit der Validierung von Motorradfahrertrainings^{51,52} und Usability-Untersuchungen^{53,54}.

⁴⁵ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 130

⁴⁶ Spornier 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 174

⁴⁷ Spiegel 1998: Die obere Hälfte des Motorrads

⁴⁸ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 36ff

⁴⁹ Kramlich 2000: Gefahrensituationen für Motorradfahrer, S. 74ff

⁵⁰ Iijima et al. 1998: Airbag Study

⁵¹ Williams et al. 2004: Motorcycle Safety Training Professionals, S. 225ff

⁵² Kerwien 2002: Wirkung von Verkehrssicherheitstrainings

⁵³ Schell 2002: Untersuchungen zur Mensch Maschine Schnittstelle am motorisierten Zweirad

⁵⁴ Kolling 1997: CAD Menschmodell

Die Umstellung der Bremse auf neue Bedienkonzepte ist durch bestehende, historisch gewachsene Bedienelemente und Bedienstrecken eingeschränkt. Schell nennt als im genannten Rahmen mögliche Neuerungen Kombibremssysteme und Bremskraftverstärkung. Schell behandelt in seiner Dissertation die Optimierung von Bedienelementen. In einer Aufspannung der Bedienelemente auf einem aus einem Häufigkeitsindex der Bedienung und einem Sicherheitsindex aufgespannten Feld stellt er die Bremse in ihrer daraus abgeleiteten Optimierungsreihenfolge mit Abstand an die erste Stelle der zu optimierenden Bedienelemente⁵⁵.

Mit der Bremsenbedienung von Motorrädern setzt sich auch Rühmann auseinander. Im Mittelpunkt stehen hierbei die maximalen isometrischen Bedienkräfte am Handbremshebel⁵⁶. Die Frage nach den maximal möglichen Bedienkräften einer Bremsenbedienung ist inzwischen durch die mit sehr geringen Handkräften bis zur Radblockade übersetzten Bremsen seit Beginn der Neunzigerjahre nicht mehr aktuell. Inzwischen werden von den Motorradherstellern wieder höhere Bedienkräfte installiert. Eine arbeitswissenschaftliche Bewertung von Bremsenbedienkräften nach dem Kriterium der Regelbarkeit der Bremskraft gewinnt vor dem Hintergrund der Kritik an der Regelbarkeit von Bremssystemen mit Hilfskraftunterstützung Gewicht und steht noch aus.

Eine der ersten Näherungen an das Mensch/Maschine-System Fahrer und Motorrad wurde von Koch durchgeführt, der das System anhand der Fähigkeit des Fahrers, der Stabilität des Gesamtsystems und der Handlichkeit des Motorrads beurteilt und so ein mechanisches Ersatzmodell erstellt, um das Motorrad über die Simulation an die Fähigkeiten des Menschen anzupassen⁵⁷. Eine arbeitsmedizinische Untersuchung zum Vergleich der körperlichen Reaktionen auf die Leistungsklasse eines Motorrads stellt signifikante Unterschiede unter anderem bei der Herzfrequenz der Testpersonen bei Fahrten im Stadtverkehr, auf der Landstraße und der Autobahn fest⁵⁸. Ebenso konnte eine körperliche Reaktion auf die Leistungsklasse des Motorrads nachgewiesen werden, wobei allerdings auch ein Zusammenhang zwischen Durchschnittsgeschwindigkeit der Versuchsfahrt und der Leistungsklasse des Motorrads hergestellt werden konnte.

⁵⁵ Schell 2002: Untersuchungen zur Mensch Maschine Schnittstelle am motorisierten Zweirad

⁵⁶ Rühmann 1988: Isometrische Handschließkräfte an Bremshebeln von Motorrädern, S. 244-250

⁵⁷ Koch 1980: Untersuchungen des Motorrad-Fahrer-Systems

⁵⁸ Huber et al. 1989: Reaktion des menschlichen Organismus' beim Fahren mit Krafträdern

2 Grundlagen der Motorradbremsung, Ableitung von Hypothesen und Voruntersuchungen

2.1 Physische und psychische Belastung

Der Motorradfahrer unterliegt während der vorwiegend als sensumotorische Arbeit und unter Betrachtung nur des körperlichen Anteils auch als schwere statische Haltearbeit einzuordnen⁵⁹ Fahrt einer vielschichtigen physischen und psychischen Belastung. Die physische Belastung resultiert zum Teil aus der Zwangshaltung, denen Motorradfahrer in größerem Umfang als Pkw-Fahrer unterworfen sind. Die überwiegende Mehrzahl der Motorradtypen besitzt keinerlei Möglichkeit einer Einstellung der Ankoppelungspunkte Sitzbank, Fläche zwischen Knien und Tank und der Ankoppelungspunkte an Fußrasten und Lenker auf die anthropometrischen Gegebenheiten des Fahrers. In dieser Zwangshaltung ist der Fahrer aerodynamischen Kräften ausgesetzt mit arbeitswissenschaftlich bezüglich ihrer Größenordnung bedenklichen, vornehmlich aus Luftverwirbelungen am Helm resultierenden akustischen Belastungen^{60,61}, Vertikalbeschleunigungen und klimatischen Belastungen. Schwingungen aus dem Antrieb des Motorrads, aus Unwuchten drehender Teile und aus der Fußpunkterregung des Motorrads kommen hinzu und werden über die vorgenannten Ankoppelungspunkte in den Körper des Fahrers eingeleitet.

Für den Fall der Bremsung muss der Fahrer die eingebrachten Verzögerungskräfte, die auf seinen Körper wirken, am Fahrzeug abstützen. Dabei kann die momentane Disposition des Fahrers unter dem Einfluss klimatischer Bedingungen (hier besonders: Kälte) oder Schwingungseinfluss⁶² (bspw. Lenkervibrationen⁶³ durch Massenschwingungen 2. Grades eines Vierzylinder-Reihenmotors⁶⁴) derart ausgeprägt sein, dass eine feinfühlige Bedienung beispielsweise des Handbremshebels auf einem für eine dem Reibwertangebot entsprechende Verzögerung angemessenen Betätigungskraftniveau dem Fahrer nicht mehr möglich ist.

Die psychische Belastung des Motorradfahrers während der Fahrt resultiert wie beim Pkw-Fahrer vorrangig aus der Verkehrssituation. Verstärkten Einfluss auf die psychische Be-

⁵⁹ Rohmert et al. 1992: Arbeitsformen, S. 35

⁶⁰ Cogotti 1998: Experimental wind tunnel techniques for two-wheel vehicles

⁶¹ Tangorra et al. 1991: Wind Noise of Motorcycle Helmets, S. 201-228

⁶² Tominaga 1994: Vibration Exposure and Symptoms when Using Motorbikes

⁶³ Lauster et al. 1993: Motorhacken

⁶⁴ Breuer 2001: Motorradskript

lastung des Motorradfahrers gegenüber dem Pkw-Fahrer hat der Zustand der Fahrbahnoberfläche, die der Motorradfahrer während der Fahrt ständig auf den scheinbaren, vom Fahrer wahrgenommenen und somit antizipierten Reibbeiwert zwischen Reifen und Straße abtastet⁶⁵. Die psychische Belastung durch den Fahrbahnzustand steigt mit fallenden Reibbeiwerten und mit der Ungleichmäßigkeit der Reibbeiwerte. Durch die vornehmlich optische Abtastung des Fahrbahnzustands durch den Fahrer kommt es primär auch auf den optischen Eindruck der Fahrbahnoberfläche an. So wird der Fahrer eine feuchte, in der Mikrotextur nicht vollständig mit Wasser benetzte Oberfläche einer Asphaltbetonfahrbahn bezüglich des von ihm optisch geschätzten Reibwertangebots gleichsetzen mit einer vollständig mit Wasser benetzten Fahrbahnoberfläche, obwohl tatsächlich Reibwertunterschiede bestehen können⁶⁶.

2.2 Physische und psychische Beanspruchung

Die physische Beanspruchung eines Motorradfahrers im Verhältnis zu der physischen Belastung hängt vornehmlich von der Konstitution und momentanen Disposition des Individuums ab.

Die psychische Beanspruchung kann im realen Straßenverkehr unabhängig von der objektiven psychischen Belastung durch die Verkehrssituation in Unfall verursachender Weise eskalieren⁶⁷. Bild 6 zeigt das Handlungsmuster eines Motorradfahrers im Zeitverlauf vom Eintritt des Ereignisses bis zum Beginn der Bremsung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind weitere notwendige Handlungen wie das Ziehen der Kupplung und das Herunterschalten während der Bremsung nicht dargestellt. Auch die Handlungsalternativen, die sich dem Motorradfahrer durch die getrennte Betätigung von Vorderrad- und Hinterradbremse eröffnen, sind nur angedeutet; ob Motorradfahrer die Vorderradbremse vor der Hinterradbremse oder umgekehrt betätigen oder nur eine der beiden Bremsen, ist ihnen beim Standardbremssystem technisch freigestellt. Angesichts der zahlreichen Handlungsalternativen, die sich dem Motorradfahrer bei der Bremsung bieten und der notwendigen Nebentätigkeiten sowie der für ihn folgenreichen Fehlhandlung „Vorderradblockade“ als Grenzsatzung kann vermutet werden, dass es im Rahmen der Motorradbremsung zu Überlastsituationen des Fahrers kommt. Ein geeignetes Mittel zur Verringerung der psychischen Beanspruchung ist Training. Nach der Entdeckung der Spiegel-Neuronen im prämotorischen Kortex kann mentales Training das tatsächliche Training beschleunigen⁶⁸. Bezogen auf die Bremsung ist der Zwang zum Trainieren im Rahmen einer Teilnahme am Straßenverkehr nicht gegeben im Gegensatz zum Training von Kurvenfahrten, dem jeder Verkehrsteilnehmer mehr oder weniger je nach Wahl der Fahrstrecke

⁶⁵ Spiegel 1998: Die obere Hälfte des Motorrads

⁶⁶ Schmieder et al. 1994: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen

⁶⁷ Spiegel 2004: Analyse eines exemplarischen schweren Alleinunfalls, S. 126-128

⁶⁸ Gallese et al. 1998: Mirror Neurons

ausgesetzt ist. Es kann also davon ausgegangen werden, dass vor allem untrainierte, d.h. im ersten Ansatz auch gemessen an ihrer Gesamtfahrerfahrung unerfahrene Fahrer während der Bremsversuche auf abgesperrter Versuchsstrecke aufgrund von operantem Konditionieren eine ausgeprägte Lernkurve aufweisen⁶⁹. Bei sehr erfahrenen Testpersonen kann diese Lernkurve auch negativ, also von guten Leistungen hin zu schlechteren, verlaufen, wenn die übersteigerte Erbringung guter Leistungen zu Misserfolg führt⁷⁰. Dies kann beispielsweise dann geschehen, wenn bei Bremsversuchen das Reibwertangebot überbeansprucht wird und dies zum Sturz oder Beinahesturz führt⁷¹.

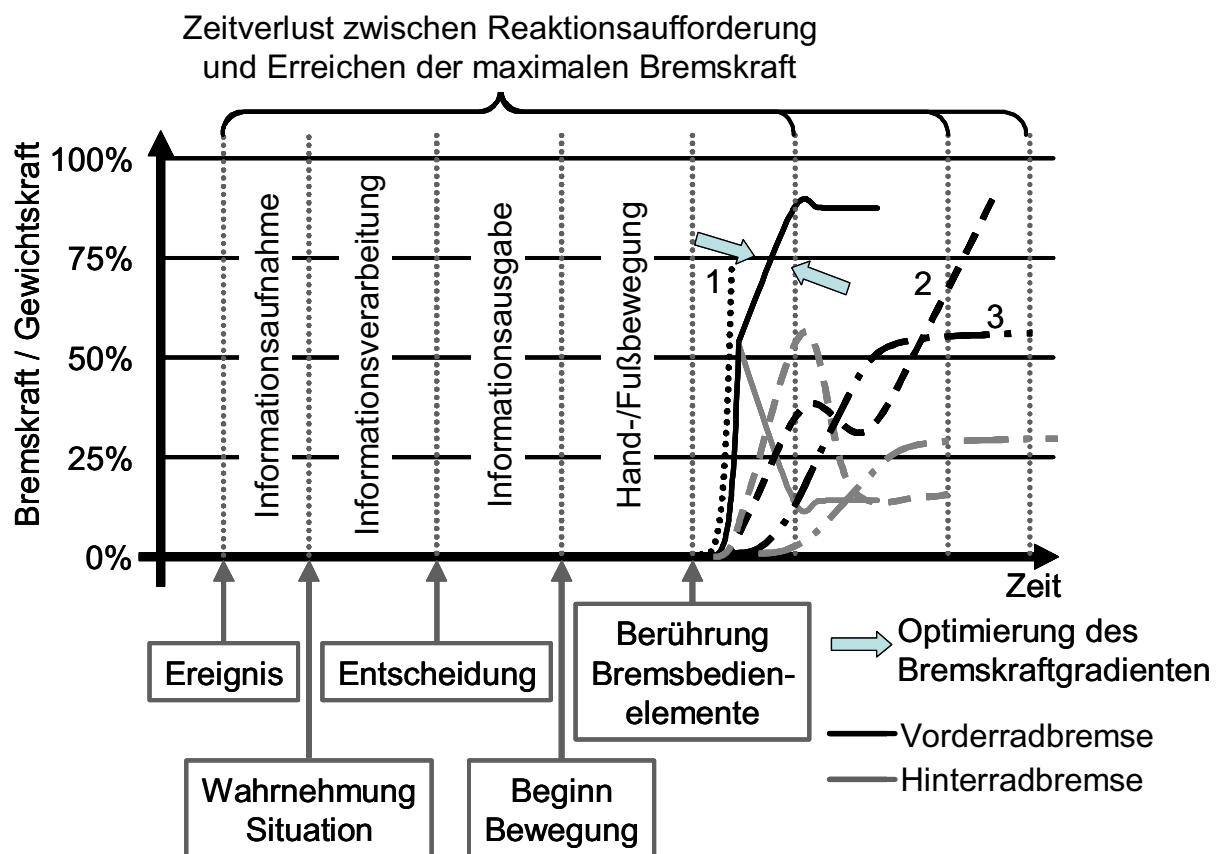


Bild 6: Schematischer Verlauf der Bremskraft über der Zeit bei einer zum Sturz führenden dynamischen Vorderradüberbremsung (1), einer synchronen Bremsenbetätigung mit kurzzeitiger Hinterradblockade (2) und der Bremsenbetätigung einer durchschnittlich erfahrenen Testperson, gezeichnet als der Vorderradbremsbetätigung nacheilende Hinterradbremsbetätigung (3) sowie ein optimaler Bremskraftanstieg, bei dem Vorderrad- und Hinterradbremskraft gegensinnige Verläufe annehmen. Bei den Verläufen (2) und (3) kann eine weitere Überhöhung der Vorderradbremskraft im Verlauf der Bremsung zum Sturz führen

⁶⁹ Echtermhoff 1992: Erfahrungsbildung von Verkehrsteilnehmern, S. 93

⁷⁰ Kerwien et al 2000, S. 135

⁷¹ Post et al. 1984: Kombibremse Motorrad

Die psychische Beanspruchung des Fahrers aus der vorab genannten Abtastung der Fahrbahnoberfläche resultiert aus der Verknüpfung der vom Fahrer gesammelten Information über den möglichen Reibbeiwert mit dem Bild, das der Fahrer von der Funktion des ihm in der Einstellung bekannten Bremssystems hat. Die interindividuell unterschiedliche Bewertung dieser verknüpften Informationen hängt entscheidend von den gemachten Erfahrungen des Fahrers im umgangssprachlichen Sinne ab⁷². Die Erfüllung einer Fahraufgabe ist daher unter anderem abhängig von den mit dieser oder einer äquivalenten Fahrsituation gemachten Erfahrungen. Ob die psychische Beanspruchung auch von der Fahraufgabe abhängt, wird überprüft werden und führt zur Formulierung der Hypothese 1, s. Kapitel 2.8.

Hypothese 1: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen sind bei allen Fahraufgaben gleich groß.

2.3 Fehlverhalten des Motorradfahrers während der Bremsung

Eine Akkumulierung psychischer Teilbeanspruchungen aus Faktoren und Größen der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung kann zu einem Maß an Ermüdung führen, aus dem eine Reduktion der Tätigkeit oder eine unerwünschte Änderung der Tätigkeit folgt⁷³. Beispielsweise kann die Grundbeanspruchung aus der Motorradfahrt durch ein Schreckereignis derart erhöht werden, dass die Fahraufgabe auf einer oder mehrerer der drei Ebenen Navigation, Bahnführung und der Stabilisierungsebene⁷⁴ nicht mehr in der gewünschten Qualität erfüllt werden kann. Die Bremsung des Motorrads stellt für den Motorradfahrer eine außerordentlich komplexe Aufgabe und somit eine Erhöhung der aus der Tätigkeit Motorradfahren resultierenden Grundbeanspruchung dar. Wie bereits in Kapitel 1.3 beschrieben ist dem Fahrer die Sensierung nur eines Kanals und somit nur einer der beiden zu betätigenden Bremsen möglich. In Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen^{75,76} zeigt Bild 7 eine vom Fahrer während einer Geradeausbremsung aus 90 km/h eingestellte Bremskraftverteilung. Die Kurve der idealen Bremskraftverteilung wird während der Bremsung nur für kurze Zeit zu Beginn der Bremsung und nur bei geringen Abbremsungen getroffen. Während das Hinterrad zumindest gegen Ende der Bremsung an der Reibwertgrenze entlang geführt wird, befindet sich das Vorderrad bis kurz vor dem Stillstand weit von der Blockadegrenze entfernt und damit weit unterhalb seiner Möglichkeiten, zur Abbremsung beizutragen. Der Bereich der maximalen

⁷² Echterhoff 1992: Erfahrungsbildung von Verkehrsteilnehmern, S. 82f

⁷³ Rohmert 1992: Beanspruchung, Ermüdung und Erholung, S. 162 und S. 165

⁷⁴ Donges 1977: Lenkverhalten von Kraftfahrern

⁷⁵ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 118ff

⁷⁶ Ecker et al. 2000: Bremsbeherrschung von Motorradfahrern, S. 165-168

Abbremsung während des Bremsvorgangs wird nur für eine sehr kurze Zeitdauer erreicht und beträgt ca. 75 %.

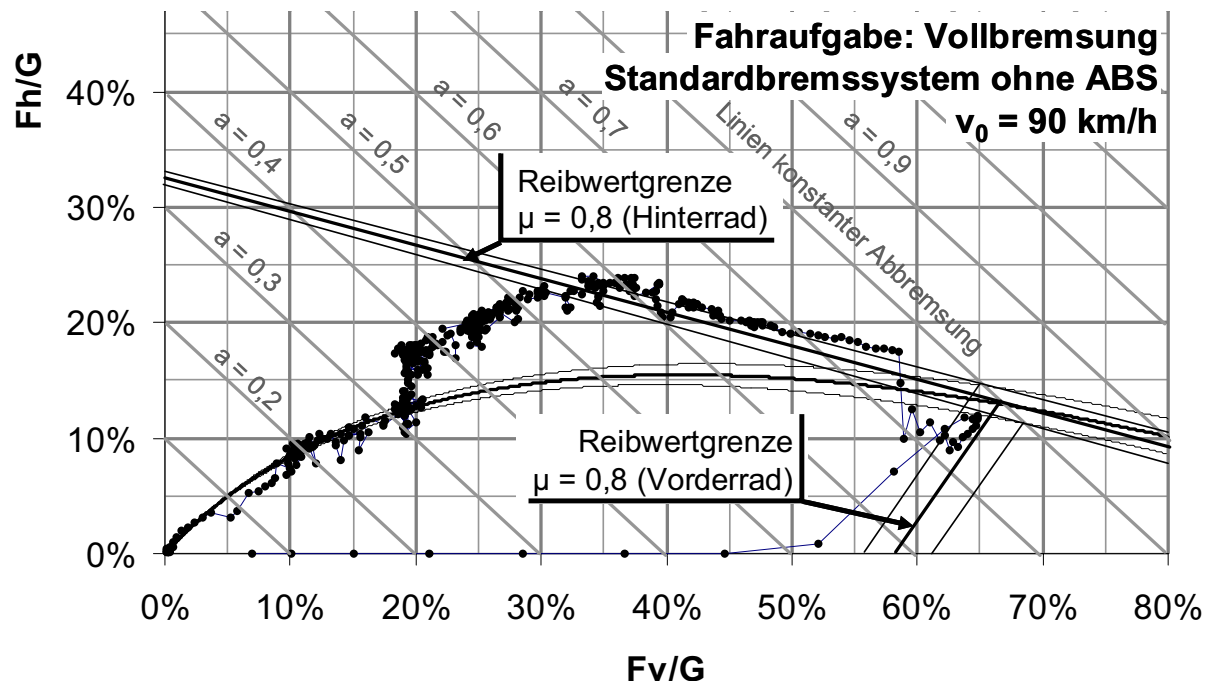


Bild 7: Bei einer Bremsung mit Standardbremse eingesteuerte Bremskraftverteilung; Reibwertgrenzen und Kurve der idealen Bremskraftverteilung mit angetragenen Fehlerbalken (Bremsituation Nr. 278), vgl. Anhang (Kap. 6.3)

Diese Angst vor einer Überbremsung des Vorderrads und den entsprechenden Konsequenzen kann im realen Straßenverkehr dahingehend zu fatalen Fehlbedienungen der Bremse führen, dass auch erfahrene Fahrer im Fall einer Notbremsung nur die Hinterradbremse betätigen. In der Unfallforschung wird berichtet, wie ein Motorradfahrer vor dem tödlichen Aufprall eine etwa 100 m lange Blockierspur mit dem Hinterrad zieht ohne die Vorderradbremse zu benutzen⁷⁷.

Diese Selbstblockade des Fahrers⁷⁸, die zur Nichthandlung als Gegenstück zur Vorderradblockade führt, kann ebenso wie die Schreck- oder Panikbremsung von den vorliegenden Versuchen auf abgesperrter Versuchsstrecke nicht provoziert werden, da den Testpersonen der Ablauf der Versuche und die Gegebenheiten im System Fahrzeug/Fahrbahn bekannt sind und die starke psychische Belastung des Schrecks nicht vorhanden ist. Daher werden Unterschiede in der messbaren psychischen Beanspruchung bei den vorliegenden Versuchen auf abgesperrter Versuchsstrecke geringer ausfallen als im realen Straßenverkehr.

⁷⁷ Spörner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 174f

⁷⁸ Spiegel 2004: Analyse eines exemplarischen schweren Alleinunfalls, S. 124

2.4 Fahrerfahrung und Fahrbegabung

Die Fähigkeiten und Fertigkeiten eines Menschen zur Regelung eines komplexen Systems wie beispielsweise dem Mensch/Maschine-System Fahrer und Motorrad zu quantifizieren, ist im Vorfeld interindividueller Betrachtungen wünschenswert. Die Vielschichtigkeit der Thematik erlaubt dies leider nur in Ansätzen. So wird die Fahrerfahrung eines Motorradfahrers oft als Ausdruck der im Laufe seines Motorradfahrerlebens mit Motorrädern zurückgelegten Kilometern benutzt^{79,80}. In anderen Untersuchungen wird die einfacher belegbare Führerscheinbesitzdauer zur Quantifizierung der Fahrerfahrung hergenommen⁸¹. In beiden Fällen kann die zufällige Betrachtung eines Einzelfalls bereits die Schwachpunkte der beiden Betrachtungsweisen offenbaren. Hier kommt die Fahrbegabung hinzu, in diesem Fall die Fähigkeit eines Menschen zur Beherrschung eines Motorrads. So gibt es Fahranfänger, die bereits hohe Quer- und Längsbeschleunigungen realisieren, und andererseits langjährige Fahrer, die viele zehntausend Kilometer auf Motorrädern zurückgelegt haben, dabei aber bislang nur einen Bruchteil der zur Verfügung stehenden physikalischen Möglichkeiten des Motorrads im wahrsten Wortsinn erfahren haben. Sogenannte schlafende Führerscheinbesitzer mit Besitzdauern von 30 Jahren und mehr, die jedoch ihren Führerschein seitdem auf einer Gesamtstrecke von erst 56 km eingesetzt haben⁸², zeigen den Schwachpunkt der Einteilung von Testpersonen nach ihrer Führerscheinbesitzdauer auf. Die tatsächliche Beherrschung eines Motorrads in bestimmten Situationen, beispielsweise bei der Slalomfahrt oder im vorliegenden Fall bei der Motorradbremsung, hängt also von der in der Arbeitswissenschaft als Disposition bezeichneten⁸³ und nicht im mathematischen Sinn zu verstehenden Summe der Fähigkeiten und Fertigkeiten, im speziellen Fall also von der Fahrbegabung und der Fahrerfahrung ab.

Diese Summe aus Fahrerfahrung und Fahrbegabung ist an praktischen Versuchen ermittelbar. Bei Fahrertrainings werden teilweise bestimmte Grundfahrrübungen zur Einteilung der Fahrergruppen durchgeführt. In Vorversuchen wurde sieben Testpersonen sehr unterschiedlicher Gesamtfahrerfahrungen die Aufgabe gestellt, mit dem Versuchsmotorrad mit dem Lenker am Anschlag Kreise zu fahren⁸⁴. Als Kriterium für die Summe aus Fahrerfahrung und Fahrbegabung diente die Zahl der ohne Bodenkontakt der Füße gefahrenen Viertelkreise. Es konnte festgestellt werden, dass sehr unerfahrene Testpersonen diesen Test nicht im Ansatz leisten können, außerordentlich erfahrene Testpersonen den Test nach einer Weile aus freien Stücken

⁷⁹ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung

⁸⁰ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung

⁸¹ Ecker et al. 2000: Bremsbeherrschung von Motorradfahrern, S. 164

⁸² Funke et al. 2001: Human Approach to Motorcycle Safety

⁸³ Luczak et al. 1992: Arbeitsaufgabe, Anforderung und Belastung, S. 84

⁸⁴ Funke et al. 2001: Human Approach to Motorcycle Safety

heraus abrechnen. Bei den erfahrenen Testpersonen mit Gesamtfahrerfahrungen zwischen 20.000 km und 90.000 km korrelierte die Anzahl der gefahrenen Viertelkreise zwar nur tendenziell mit der Gesamtfahrerfahrung, jedoch konnte aus den Vorversuchen nicht abgeleitet werden, dass solche Tests zur Ermittlung der Summe aus Fahrerfahrung und Fahrbegabung für die vorliegenden Versuche notwendig seien zur Klassifizierung der Testpersonen.

Die mögliche Kompensation eines Mangels an Fähigkeiten oder Fertigkeiten durch technische Unterstützung wird in allen Bereichen des menschlichen Tuns und Handelns praktiziert. Der Erfüllungsgrad der Umsetzung der Kompensation kann je nach Ausprägung des Mangels an Fähigkeiten und Fertigkeiten unterschiedlich sein. Auf den Untersuchungsgegenstand bezogen bedeutet dies, dass die Kompensation des Bremsregelverhaltens des in Bezug auf die Motorradbremsung regelungstechnisch mangelhaften Reglers Mensch, dessen Darstellung im Zusammenhang mit Fahraufgaben hinlänglich bekannt ist, durch das technische Hilfsmittel ABS von der Gesamtfahrerfahrung des Fahrers abhängt. Daher soll in dieser Arbeit geklärt werden, welchen Einfluss die Fahrerfahrung gemessen an der oben beschriebenen Gesamtfahrerfahrung auf die Bremsung hat. Insbesondere wird untersucht, ob ein Fahrerassistenzsystem wie ABS aus der Fahrerfahrung resultierende Unterschiede in der Erbringung der Bremsleistung ganz oder teilweise ausgleichen kann, was zur Formulierung von Hypothese 2 führt, s. Kapitel 2.8.

Hypothese 2: Bei Bremsungen mit ABS sind die von den Testpersonen erzielten Bremsleistungen nicht von deren Gesamtfahrerfahrungen abhängig.

2.5 Radblockade aufgrund von Bremskraftüberhöhung

Die Blockade eines Rads während der Bremsung bedeutet für die Kraftübertragung an dem betroffenen Rad, dass nur noch Kräfte gegen die Bewegungsrichtung des Radaufstandspunkts übertragen werden können und weitestgehend keine Querkräfte zur Bewegungsrichtung. Beim Motorrad fallen überdies die stabilisierenden Kreiselkräfte weg, die im Verhältnis von Hinterrad- zu Vorderradnachlauf zu einem überwiegenden Teil vom Vorderrad aufgebracht werden⁸⁵. In der Literatur wird bei einem Sturz wegen eines überbremsen Vorderrads das Hauptaugenmerk auf den Wegfall der Kreiselkräfte des Vorderrads gelegt^{86,87,88,89}. Ein Vergleich mit einem nicht kreiselstabilisierten Einspurfahrzeug wie einem Monoski zeigt an-

⁸⁵ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 31

⁸⁶ Post et al. 1984: Kombibremse Motorrad

⁸⁷ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung

⁸⁸ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung

⁸⁹ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremsysteme

schaulich, dass eine stabile Kurven- und Geradeausfahrt auch ohne Kreiselkräfte allein über die Aufbringung von Querkräften möglich ist.

Die Folgen einer Vorderradblockade sind schwerwiegender als die Folgen einer Hinterradblockade⁹⁰: Lüpertz⁹¹ zeigt auf, dass der bei einer Vorderradblockade gestürzte Motorradfahrer vor sein Motorrad stürzt und aufgrund des im Allgemeinen geringeren Reibbeiwerts des gestürzten Motorrads von diesem über eine größere Rutschstrecke geschoben wird als bei einem Sturz aufgrund einer Hinterradblockade, bei dem das Motorrad vor dem Fahrer wegrutscht. Kommt es während des Sturzverlaufs im Anschluss an eine Vorderradblockade zu einer Kollision mit einem Objekt, wird der Motorradfahrer mit für ihn meist fatalen Folgen vom nachfolgenden Motorrad eingequetscht. Die zeitlichen Abfolgen von Vorderradblockaden führen oft innerhalb allgemein anerkannter Reaktionszeiten⁹² im Verkehr zum Sturz⁹³, vgl. auch Kapitel 2.5.2.

2.5.1 Fahr- und Sturzverhalten bei einer Hinterradblockade

Betrachtet man ein sich in stabiler Geradeausfahrt befindliches Motorrad, so kann diese Geradeausfahrt nicht als seitenkraftfrei angesehen werden. Diese aufgrund des instabilen Gleichgewichts eines Motorrads bei Geradeausfahrt auftretenden Seitenkräfte gleicht der Fahrer unbewusst durch Lenkbewegungen aus, die zu einer Aneinanderkettung von Kurvenfahrten mit sehr großen Kurvenradien alternierend um die beabsichtigte Bahnkurve führen. Das bedeutet, dass am Motorrad in der Praxis stets Seitenkräfte angreifen, die in den Radaufstandspunkten abgestützt werden. Diese Seitenkräfte können außer aus besagter Kurvenfahrt auch beispielsweise aus einer quergeneigten Fahrbahn, einem außermittigen Gesamtschwerpunkt, einer Beaufschlagung mit Seitenwind, asymmetrischem aerodynamischem Auftrieb oder in diesem Zusammenhang zurecht meist vernachlässigten Kräften wie der Corioliskraft herrühren. Bei einer Hinterradblockade aus diesem nicht seitenkraftfreien Zustand heraus fällt die Seitenführungskraft am Hinterrad weg, und die am Fahrzeug angreifende Seitenkraft beginnt gegen die Gierträchtigkeit des Motorrads das Motorrad um den Vorderradaufstandspunkt (oder auch: um die Lenkachse oder eine Kombination aus beidem) zu drehen. Aus dem motorradfesten Koordinatensystem betrachtet bedeutet dies mit zunehmendem Gierwinkel eine Verschiebung der Radaufstandslinie in Bewegungsrichtung nach vorne unter dem Schwerpunkt weg und eine sich gleichsinnig aufbauende Querkraft am Hinterrad, s. Bild 8. Wird das Produkt dieses Querkraftanteils der Hinterradbremskraft mit dem aktuellen Abstand zwischen Vorderrad- und Hinterradaufstandspunkt (der im Fall des zu Null gesetzten Lenkerdrehwin-

⁹⁰ Otte et al. 1986: Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer

⁹¹ Lüpertz 1979: Brems- und Blockierverhalten von Motorrädern, S. 99ff

⁹² Burckhardt 1985: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen

⁹³ Spörner et al. 2000: Aktive und passive Sicherheit bei Motorradkollisionen, S. 74ff

kels dem Radstand entspricht) größer als der am Gesamtschwerpunkt angreifende Querkraftanteil der Verzögerungskraft zusammen mit der Seitenkraft multipliziert mit dem horizontalen Abstand zwischen Vorderradaufstandspunkt und Gesamtschwerpunkt, so baut sich der Gierwinkel wieder ab. Äquivalent dazu verhält sich das Gleichgewicht in Fahrzeug-y-z-Ebene. Dieser Mechanismus sich gegenseitig auf- und abbauender Kraftanteile kann bei einem ausreichend geringen Verhältnis von Seitenkraft zum Produkt aus der Hinterradaufstandskraft mit dem Reibwert zwischen dem blockierten Reifen und der Fahrbahn zu einem stabilen Gleichgewicht führen, welches durch den Fahrer während der Bremsung durch Variation des Drehpunkts des Motorrads (i.e. Lenken), der Beeinflussung des aus der Längsbeschleunigung resultierenden Anteils über die Nachgiebigkeit des Drehpunkts (i.e. Vorderradbremskraft) oder der x-Koordinate des Gesamtschwerpunkts durch Verlagerung seiner Körpermasse abgestimmt werden kann. Diese Abstimmung des Systems durch den Menschen kann bereits bei Fahrrad fahrenden Kindern beobachtet werden.

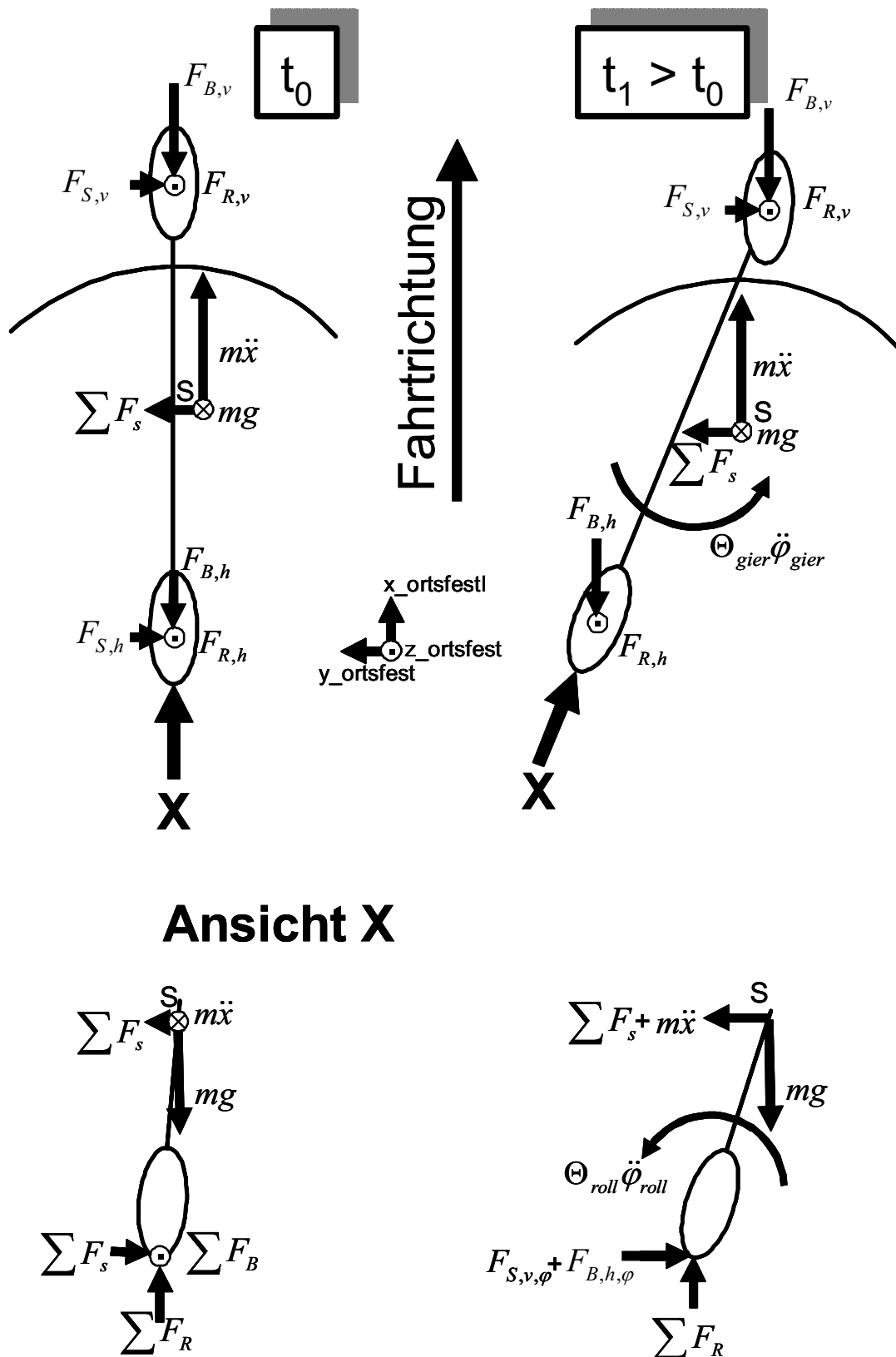


Bild 8: Kräfte und Momente bei einer Hinterradbremse zu den Zeitpunkten t_0 (stabile Fahrt unter Seitenkraft) und t_1 (blockiertes Hinterrad und gebremstes Vorderrad unter Seitenkraft)

2.5.2 Ablauf eines Sturzes nach einer Vorderradblockade

Bei einer Vorderradblockade beginnt das Motorrad um den Hinterradaufstandspunkt gegen die träge Masse des Motorrads zu gieren, und die Radaufstandslinie wird in Bewegungsrichtung nach hinten unter dem Gesamtschwerpunkt weggeführt, s. Bild 9. Mit fortschreitender Zeit werden in der Betrachtung ortsfester Koordinaten der Gierwinkel und aufgrund der Massenträgheit des Systems Fahrer und Motorrad der Rollwinkel größer, und mit ihnen ebenfalls die sich aus der Differenz zwischen jeweils aus der Vorderradbremskraft und aus den weiteren am System angreifenden Kräften resultierenden Drehmomenten um den Hinterradaufstandspunkt ergebenden, in Fahrzeug-z-Richtung und Fahrzeug-x-Richtung projizierten Drehmomente. Durch den über den sich aufbauenden Gierwinkel entstehenden Schwimmwinkel baut das Hinterrad eine entsprechende Schräglaufseitenkraft auf, die als Gegenkraft zur Massenträgheit des Systems den Aufbau eines Rollwinkels beschleunigt. Rollrate und Gierrate sind progressiv, so dass nicht nur kein Gleichgewichtszustand eintritt, sondern der Verlauf des Unfalls selbstverstärkend ist, s. rechte Seite von Bild 9. Dementsprechend ist die Zeitspanne vom Beginn der Vorderradblockade an gerechnet bis zum Sturz kürzer als bei einer Hinterradblockade, ebenso die Zeitspanne einer Eingriffsmöglichkeit bis zum Point of no Return, nach dem auch durch unmittelbaren Fahrereingriff ein Unfall nicht mehr aus eigener Kraft zu verhindern ist. Die Kreiselkraft des Vorderrads kann zur Stabilisierung des Versuchsmotorrads bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 90 km/h mit einer Größenordnung von maximal 70 Nm beitragen unter der Annahme, dass die maximale Lenkerdrehwinkelgeschwindigkeit $100^\circ/\text{s}$ beträgt⁹⁴. Bei den während der vorliegenden Versuche gefahrenen Geschwindigkeiten ist der Wegfall der Kreiselkräfte also als sekundär zu betrachten. Als Sturzursache sind die fehlenden Seitenführungskräfte des Vorderrads anzusehen.

Aus dieser theoretischen Betrachtung kann gefolgert werden, dass ein Motorradfahrer eine Vorderradblockade auch auf abgesperrter Versuchsstrecke angesichts der latenten Sturzgefahr bereits im Vorfeld zu vermeiden sucht. Dies steht bei nicht blockiergesicherten Bremssystemen im Grenzkonflikt zur formulierten Versuchsaufgabe, einen möglichst kurzen Bremsweg zu erzielen. Wenn eine Testperson den Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn während des Versuchs voll ausnutzt und damit die Versuchsaufgabe bestmöglich erfüllt, so genügt eine Veränderung in den Reibbeiwerten zwischen Bremsbelägen und Bremsscheiben oder zwischen Reifen und Fahrbahn oder eine Schwankung der Radlast oder der Spannkraft der Bremssättel aufgrund von Scheibendickenschwankungen o.ä., und schon wandelt sich die perfekte Bremsung in eine gefürchtete Vorderradblockade.

⁹⁴ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 31

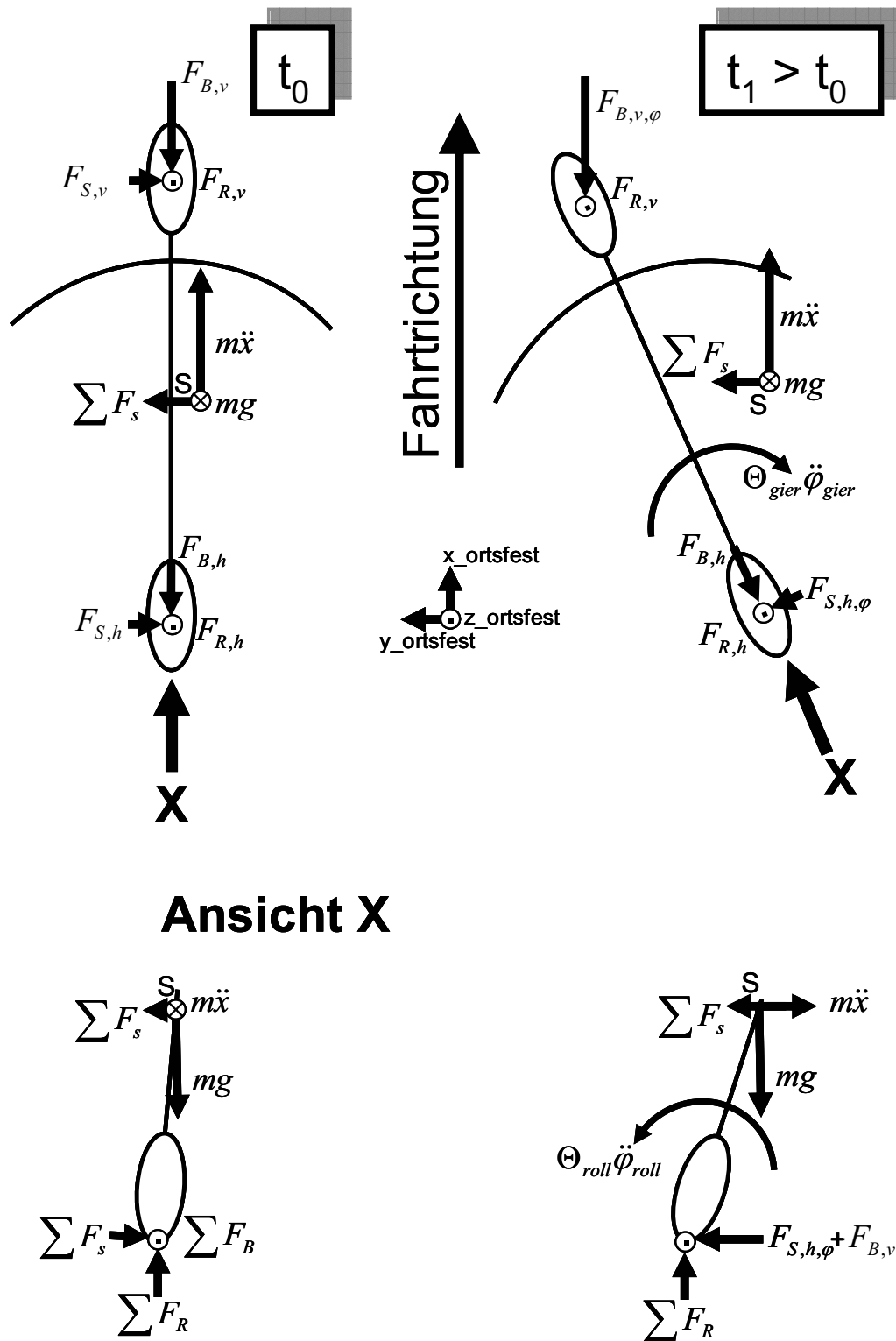


Bild 9: Kräfte und Momente bei der Vorderradblockade zu den Zeitpunkten t_0 (stabile Fahrt unter Seitenkraft) und t_1 (blockiertes Vorderrad und gebremstes Hinterrad unter Seitenkraft)

Im Rahmen von Versuchen zur dynamischen Vorderradüberbremsung^{95,96} wurden absichtlich Vorderradblockaden herbeigeführt. Die Versuche wurden von einem sehr erfahrenen Versuchsfahrer durchgeführt, und es kann angenommen werden, dass sie aufgrund der Aufgabenstellung und der daraus folgenden Präposition des Systems Fahrer/Motorrad die für den untersuchten Fahrzeugtyp und die Ausgangsgeschwindigkeiten von 30 km/h bis 60 km/h maximal möglichen Blockadezeiten entsprechen. Bild 10 zeigt die in den Versuchen zur dynamischen Vorderradüberbremsung erzielten maximalen Blockadedauern.

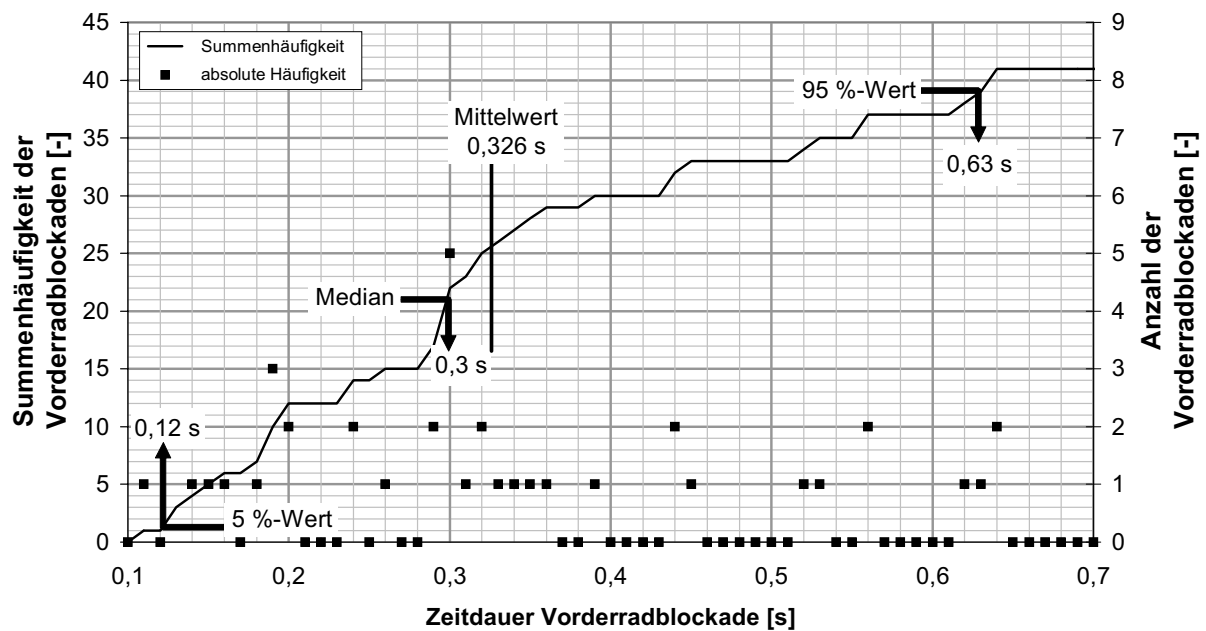


Bild 10: Summenhäufigkeit und absolute Häufigkeit der Zeitdauern der Vorderradblockade bei Versuchen zur dynamischen Vorderradüberbremsung

Keine der 41 Vorderradblockaden, die mit dem Ziel einer langen Blockadedauer absichtlich herbeigeführt und mit einem dementsprechend präpositionierten System Fahrer und Motorrad durchgeführt wurden, dauert länger als 0,64 s, und auch der Median der Blockadedauern fällt mit 0,3 s niedrig aus.

Bei den vorliegenden Bremsversuchen mit der Aufgabe der Erzielung geringstmöglicher Bremswege ist, wie oben beschrieben, eine Blockade des Vorderrads zu vermeiden. Die Präposition des Systems Fahrer und Motorrad ist nicht auf eine Vorderradblockade ausgerichtet, und der Bremsbeginn kann vom Fahrer nur in Grenzen frei bestimmt werden. Dahingehend sind die Randbedingungen bei den 137 ebenfalls hinsichtlich der Blockadedauern ausgewerteten, während der vorliegenden Versuche nicht zu sturzrelevanten Situationen führenden Vorderradblockaden besser angenähert an denen der im realen Straßenverkehr auftretenden

⁹⁵ Funke 2000: Dynamische Vorderradüberbremsung bei Motorrädern, veröffentlicht in: Koch et al. 2004, S. 379

⁹⁶ Spörner 2003: Bremsen als Todesursache, S. 125

Blockadedauern des überbremsten Vorderrads als die der Versuche zur dynamischen Vorder-
radüberbremsung durchgeführten Blockadeversuche. Bild 11 zeigt die absolute Häufigkeit
und die Summenhäufigkeit der Blockadedauern von bei Bremssystemen ohne ABS aufgetre-
tenen Blockadesituationen.

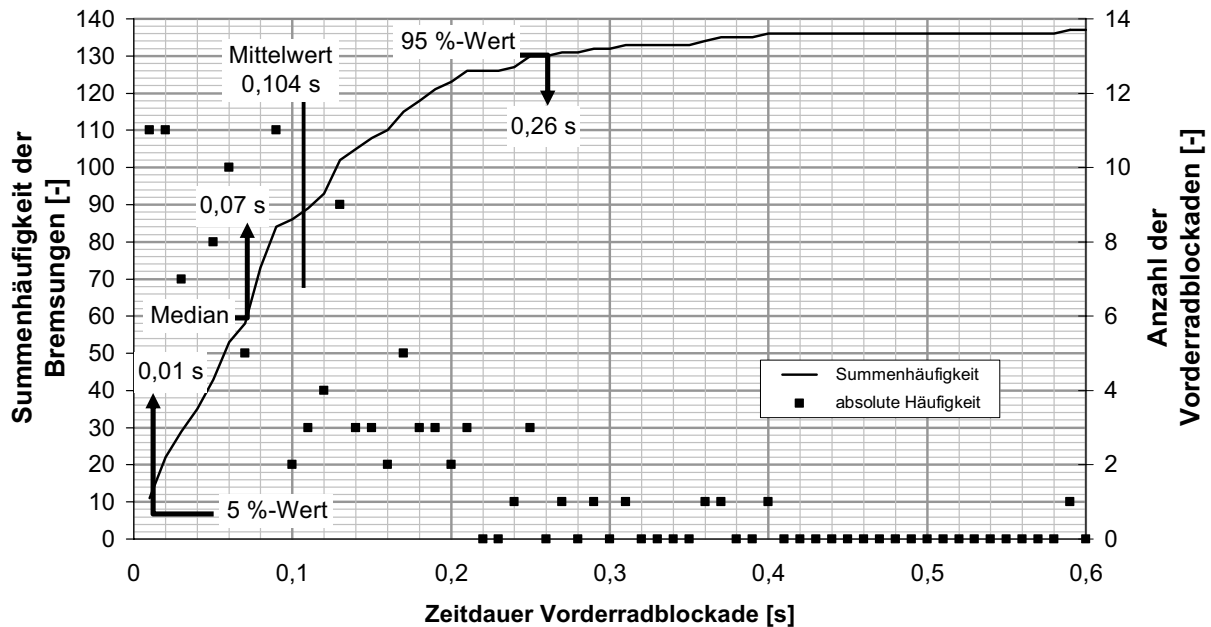


Bild 11: Summenhäufigkeit und absolute Häufigkeit der Zeitdauern von nicht sturzrelevanten Vorderradblockadesituationen bei Bremsversuchen zur Erzielung geringstmöglicher Bremswege

Im Vergleich mit den in Bild 10 dargestellten Blockadedauern sind die während der vorliegenden Versuche aufgezeichneten Blockadedauern um ein Vielfaches kürzer. Die maximale Blockadedauer beträgt mit großem Abstand 0,59 s und ist der sehr erfahrenen Testperson Nr. 7 zuzuordnen. Die Blockadedauern im Allgemeinen sind sehr kurz und liegen mehrheitlich sogar unter der Verarbeitungszeit der menschlichen Informationsaufnahme, also unterhalb von 100 ms bis 200 ms⁹⁷. Ein Grund dafür ist, dass der Mensch bei entsprechender Aufmerksamkeit durchaus in der Lage ist, ein über einen Zeitraum in der Größenordnung von Zehntelsekunden in die Blockade laufendes Rad vor der tatsächlichen Blockade zu antizipieren und gegenzusteuern. Bei den vorliegenden Bremsversuchen kann davon ausgegangen werden, dass diese erhöhte Aufmerksamkeit des Fahrers gegenüber Radblockaden gegeben ist. Dennoch ist es im Verlauf der Versuche zu vier sturzrelevanten Situationen gekommen, in deren Verlauf jeweils die Umsturzsicherung des Motorrads eingriff und es teilweise zu einer Lösung des Fahrers vom Motorrad gekommen war. Drei der Situationen fanden bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h statt, eine bei der

⁹⁷ Bubb 1992: Menschliche Zuverlässigkeit

Kurvenbremsung. Bei keiner dieser sturzrelevanten Situationen betrug die Dauer der vorangehenden Vorderradblockade mehr als 0,2 s.

Die hier gemachten Aussagen decken sich mit der Beschreibung der Länge der Vorderradbremsspuren ausgewählter Unfälle mit vorangehender Vorderradblockade⁹⁸. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass durch eine zufällig sehr günstige Präposition des Systems Fahrer und Motorrad auch sehr viel längere Blockadezeiten mit entsprechend langen Vorderradbremsspuren auch bei niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten erzielt werden können.

2.6 Bremsleistung, Belastung, Beanspruchung und Befindlichkeit

Im arbeitswissenschaftlichen Verständnis ist Bremsleistung übersetzbar als der Erfüllungsgrad der Versuchsaufgabe „Versuchsmotorrad so schnell wie möglich zum Stehen bringen“. Dementsprechend kann die Bremsleistung ausgedrückt werden in Bremswegen, Bremszeiten oder Bremsverzögerungen über dem Weg oder

der Zeit. Das mechanische Verständnis von Bremsleistung als zeitbezogene, gewandelte kinetische Energie ist für den interindividuellen Vergleich ungeeignet, da die Gesamtmasse von Fahrzeug und Fahrer je nach Fahrer variiert, und liefert gegenüber anderen Kenngrößen keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die mechanische Bremsleistung daher nicht betrachtet werden.

Hypothese 3: Die von den Testpersonen erzielten, über der Zeit gemittelten, Verzögerungen mit und ohne ABS unterscheiden sich nicht.

Die Aufgabenstellung an die Testpersonen ist über alle Bremssysteme und Versuche gleich zu halten und zielt auf eine Minimierung des für eine Bremsung aus einer einzustellenden Geschwindigkeit benötigten Bremswegs. Wenn die Aufgabe sich nicht ändert und sich ebenfalls die weiteren Versuchsparameter nicht ändern, dann wird angenommen, dass die Testperson ihr Verhalten ebenfalls nicht ändert und im Rahmen ihrer Möglichkeiten reproduzierbare Ergebnisse liefert. Eine weitere Anforderung an die Versuchsgestaltung lautet, dass diese gewährleistet, dass mögliche Einflussparameter – abgesehen von der zu untersuchenden Einflussgröße – über dem Versuchsverlauf konstant gehalten werden. Unter den Randbedingungen der Gleichhaltung eventueller Einflussgrößen besteht also kein Grund zur Annahme, dass die intraindividuell erziel-

Hypothese 4: Die von den Testpersonen mit Standardbremssystem ohne ABS erzielten Bremsleistungen sind größer als die mit Kombinationsbremssystem ohne ABS erzielten.

⁹⁸ Spörner 2000, S. 67 und S. 74

ten Verzögerungen bei Bremsungen mit verschiedenen Bremssystemen bei identischer Fahraufgabe signifikant unterschiedlich sind (Hypothese 3, Hypothese 4 und Hypothese 5).

Die physische Belastung auf den Fahrer ist bei Bremsversuchen vor allem anderen abhängig von

Hypothese 5: Die von den Testpersonen mit dem zweihebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem erzielten Bremsleistungen sind gleich denen mit dem einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem erzielten.

der Fahrer Masse und der Höhe der Verzögerung. Bei den vorliegenden Bremsversuchen kommen noch Nebenzeiten hinzu, in denen die Testperson den nächsten Versuch anfährt und die Ausgangsgeschwindigkeit einstellt. Es konnte beobachtet werden, dass sich das Beschleunigungsverhalten in diesen Nebenzeiten als maßgebliche Belastungsgröße intraindividuell nicht signifikant änderte. Besonders das Verhalten des Fahrers in den Nebenzeiten kann Ausdruck seiner momentanen Befindlichkeit sein. Hierbei ist die Wirkrichtung nur mit dem Werkzeug einer Eigenzustandsbeschreibung nicht belegbar – ob die Befindlichkeit sich auf die Bremsleistung und das Verhalten in den Nebenzeiten auswirkt oder umgekehrt, bleibt ungewiss. Möglichst konstante Befindlichkeitskennwerte vereinfachen daher die Auswertung der Versuchsergebnisse. Die Befindlichkeit der Testpersonen wurde mit einem bei Fahrertrainings eingesetzten Befindlichkeits-Kurztest⁹⁹, einer Form der Eigenzustandsbeschreibung, ermittelt. Bild 12 zeigt eine Auswertung der während der Versuche abgefragten Eigenschaftsbewertungen durch die Testpersonen in Abhängigkeit vom benutzten Bremssystem.

Die Eigenzustandsskalierung kann prinzipbedingt ohne tatsächliche und, so weit dies zu beurteilen möglich ist, objektive Änderung um eine Bewertungsstufe variieren. Alle Eigenzustandsattribute weisen keine signifikanten Schwankungen nach Bremssystemen auf. Auch die mit der Bremsaufgabe verbundenen Attribute „risikobereit“, „kompetent“ und „sicher“ zeigen in Abhängigkeit des Entwicklungsgrads des Bremssystems nur geringe Tendenzen.

⁹⁹ Kerwien et al. 2000: Subjektive Sicherheit bei Rennstreckentrainings, S. 129-144

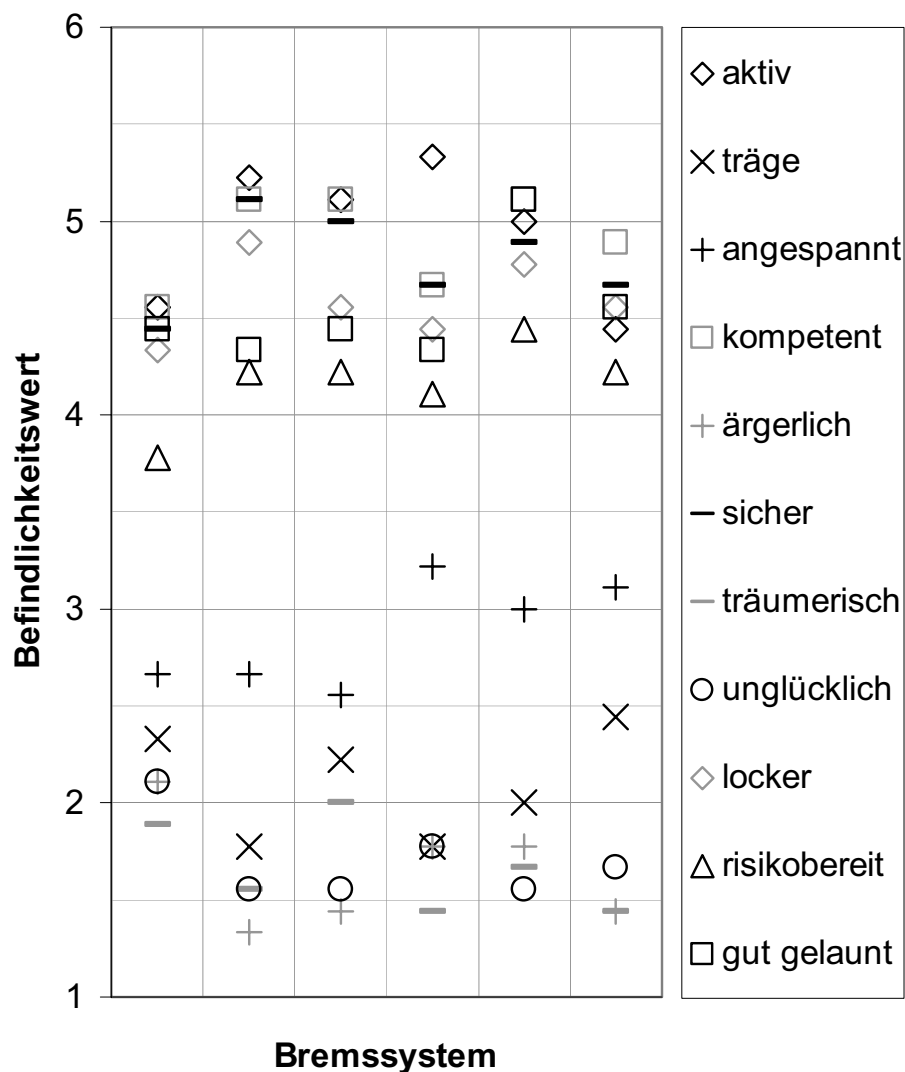


Bild 12: Mittelwerte der Befindlichkeit (aus 7 Bewertungsstufen: 1 = gar nicht; 7 = außerordentlich) aller Testpersonen nach Bremssystemen geordnet; die erste Wertespalte zeigt die angegebenen Eigenzustände der Testpersonen vor der Versuchsdurchführung, die anderen Wertespalten die Eigenzustände der Testpersonen nach der Versuchsdurchführung jeweils mit dem links von der betreffenden Wertespalte beschriebenen Bremssystem

Ebenso ist die Darstellung dieser Eigenschaftsbewertung über der Versuchsreihenfolge ohne Befund, s. Bild 13. Keines der Befindlichkeitsattribute kann eine signifikante Abhängigkeit vom Versuchsfortschritt aufweisen. Einzig dem Attribut „angespannt“ kann ein Trend zugeordnet werden hin zu geringeren Werten über dem Versuchsfortschritt.

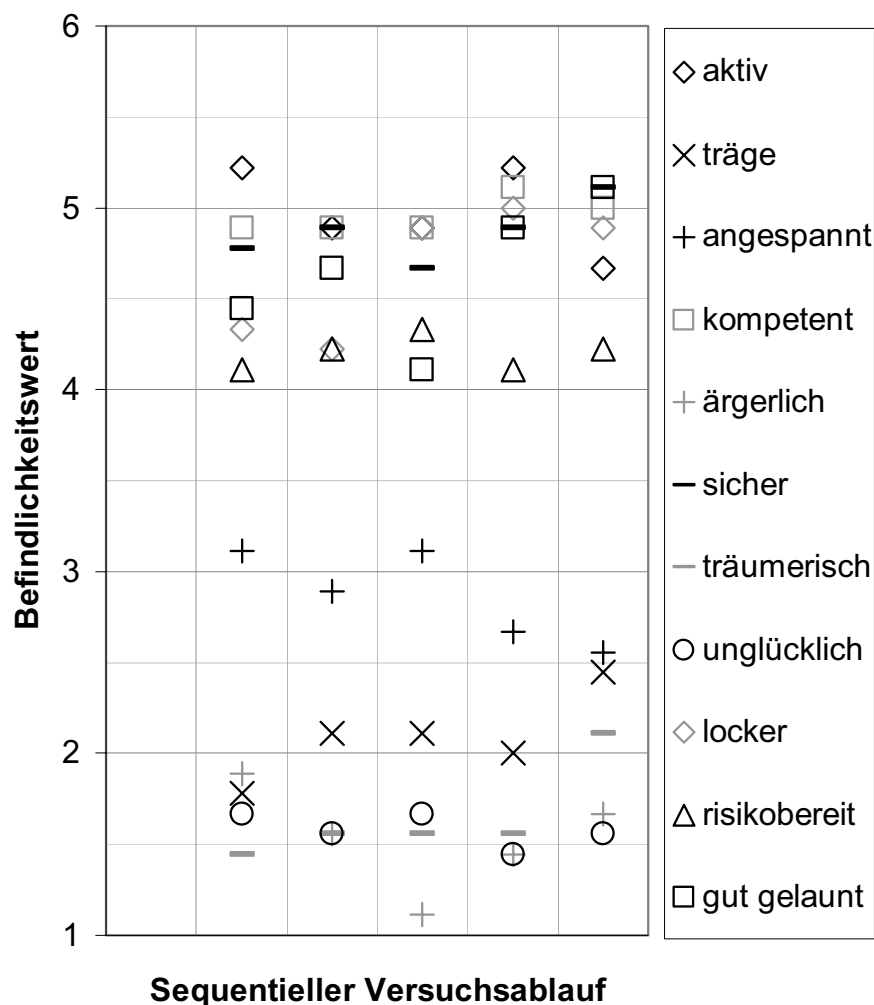


Bild 13: Mittelwerte der Befindlichkeitswerte (aus 7 Bewertungsstufen: 1 = gar nicht; 7 = außerordentlich) aus der Eigenzustandsskalierung aller Testpersonen, aufsteigend sortiert nach dem Versuchsfortschritt, unter Auslassung der vor dem ersten Versuchsdurchlauf angegebenen Befindlichkeitswerte

Die physische und die psychische Beanspruchung werden nicht isoliert ermittelt, sondern nur gemeinsam. Die physische Beanspruchung hängt von der physischen

Hypothese 6: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit und ohne ABS sind gleich groß.

Belastung ab, die intraindividuell u. a. von der Verzögerung bestimmt wird. Weiterhin führt muskuläre Ermüdung zu einer Erhöhung der muskulären Beanspruchungsgrößen^{100,101}. Auf-

¹⁰⁰ Rohmert 1992: Beanspruchung, Ermüdung und Erholung, S. 173

¹⁰¹ Zipp 1988: Oberflächenableitung bioelektrischer Signale, S. 35

grund der ermüdungsphänomenologisch kurzen Versuchsdauer¹⁰² und der zu erwartenden ähnlichen Beschleunigungsspektren sowohl im Versuch als auch in den Nebenzeiten wird hier davon ausgegangen, dass die phy-

Hypothese 7: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit einem Standardbremssystem ohne ABS sind niedriger als die bei der Versuchsdurchführung mit einem Kombinationsbremssystem ohne ABS.

sische Beanspruchung intraindividuell nicht signifikant variiert. Wenn die aufgezeichneten Beanspruchungsparameter jedoch signifikante Abweichungen bei verschiedenen Bremssystemen aufweisen, so sind diese demnach auf die psychische Beanspruchung der Testpersonen zurückzuführen, woraus Hypothese 6, Hypothese 7 und Hypothese 8 formuliert werden.

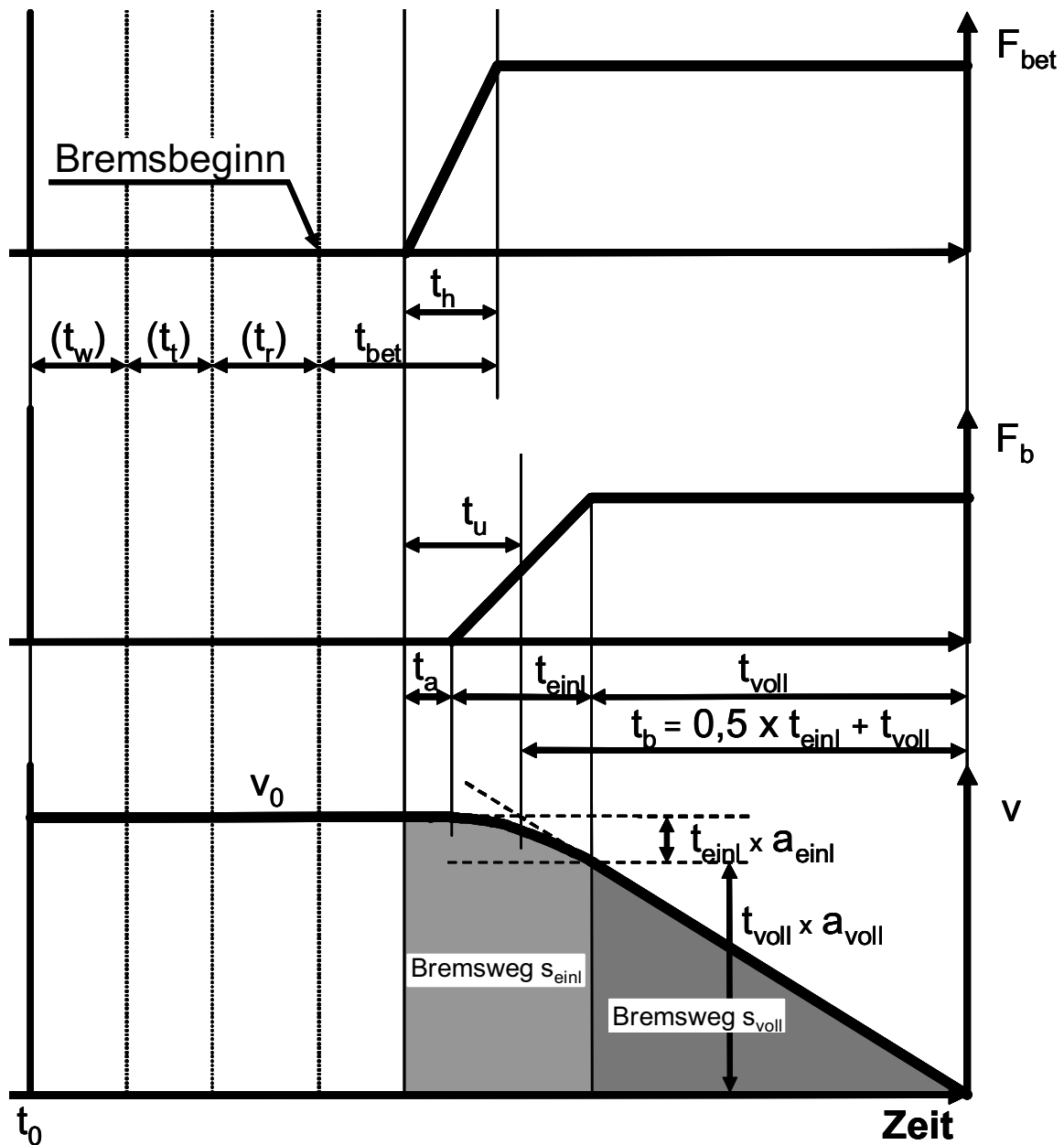
Hypothese 8: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit einem zweihebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem sind genau so hoch wie die bei der Versuchsdurchführung mit einem einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem.

2.7 Definition der Einleitungsphase einer Bremsung

Der zeitliche Ablauf einer Vollbremsung beim Motorrad lässt sich wie bei anderen Fahrzeugen in die Phasen der Wahrnehmung, des Schrecks, der Reaktion und der Betätigung auf der Seite des Fahrers und fahrzeugseitig in die Phasen des Ansprechens der Bremse, des Bremskraftaufbaus und der Vollbremsung einordnen¹⁰³, s. Bild 14. Die eingeklammerten Zeitanteile sind bei Versuchen auf abgesperrtem Testgelände mit von den Testpersonen voraussehbarem Versuchsablauf nicht existent. Bei einem Motorrad mit Standardbremse sind die Phase der Reaktion und die zeitlich nachfolgenden, fahrer- oder fahrzeugseitigen Phasen trennbar in Anteile der Vorderradbremse und der Hinterradbremse am zeitlichen Verlauf der Bremsverzögerung.

¹⁰² Rohmert 1992: Beanspruchung, Ermüdung und Erholung, S. 165ff

¹⁰³ Breuer 2001: Motorradsript



v_0	Ausgangsgeschwindigkeit	t_a	Ansprechzeit der Bremsanlage
v	Fahrzeuggeschwindigkeit	t_b	Bremszeit
a_{einl}	Fahrzeugverzögerung	t_{bet}	Betätigungszeit
a_{voll}	Fahrzeugverzögerung	t_{einl}	Dauer der Einleitungsphase
s_{einl}	Bremsweg in der Einleitungsphase	t_h	Schwellzeit der Bremsbetätigungskraft
s_{voll}	Bremsweg in der Vollverzögerungsphase	t_r	Reaktionszeit
F_{bet}	Bremsbetätigungskraft	t_t	Schreckzeit
F_b	Bremskraft	t_u	Verlustzeit
		t_{voll}	Dauer der Vollverzögerungsphase
		t_w	Wahrnehmungszeit

Bild 14: Zeitlicher Ablauf einer Bremsung

Bei Versuchen auf abgesperrter Versuchsstrecke mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchsaufbau werden die Wahrnehmungszeit, die Schreckzeit und die Reaktionszeit nicht betrachtet. Der Fahrer kennt den Wegpunkt des Beginns der Bremsung; die Wahrnehmungszeit ist daher obsolet. Eine Schreckzeit kann folglich als in dem vorliegenden Versuch nicht existent betrachtet werden, ebenso eine Reaktionszeit. Der Bremsvorgang beginnt demnach im vorliegenden Fall mit der Betätigung mindestens eines der Bremshebel. Der Bremsweg hängt fahrer-, fahrzeug- und fahrbahnseitig im Folgenden ab vom Gradienten und der Höhe des vom Fahrer eingesteuerten Bremsdrucks, der Ansprechzeit der Bremse, der vom Bremsdruck und von Bremssystemparametern abhängigen Bremskraft und dem Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn.

Es kann in den Bremssystemparametern wirksamer Reibhalbmesser und Reibbeiwert zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe zu nicht unerheblichen Schwankungen sowohl über Bremsungen hinweg als auch im Verlauf einer Bremsung kommen¹⁰⁴. Diese Schwankungen sind primär nicht vom verwendeten Bremsbetätigungssystem (mit/ohne ABS, Standard- bzw. Kombinationsbremsanlage) abhängig, sondern parameterinduziert hauptsächlich vom Verschleißzustand einer Bremsanlage und den Temperaturen von Bremsbelag und -scheibe¹⁰⁵. Dies bildet die Realität im Fahrbetrieb eines Motorrads ab und wird – wenn nötig – vom Fahrer durch Anpassung des Betätigungsdrucks kompensiert. Bei den vorliegenden Versuchen wurden die Einfluss nehmenden Parameter Verschleiß durch Einhaltung der Werkstattvorschriften und Temperatur durch ausreichend lange Abkühlphasen über die Versuche hinweg möglichst gleich vorgegeben, um deren Schwankung zu minimieren.

Da die genannten Bremssystemparameter – zu nennen sind beispielhaft wirksame Reibdurchmesser, Reibbeiwerte zwischen Bremsbelägen und Bremsscheiben und hydraulische Wirkungsgrade – und näherungsweise der Reibbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn wie beschrieben über den Versuchen konstant gehalten werden durch die Verwendung ein und desselben Versuchsfahrzeugs bei denselben eingestellten Reifen- und Fahrbahnparametern, hängt die Verzögerung vornehmlich vom durch den Fahrer aufgebrachten Bremsdruck ab, bei einer Standardbremse von den vom Fahrer aufgebrachten Bremsdrücken. Diese Betrachtung der fahrer-, fahrzeug- und fahrbahnseitigen Parameter lässt den Schluss zu, dass in einem interindividuellen und intraindividuellen Vergleich der Bremsungskenngrößen der Fahrer von dem Zeitpunkt der Betätigung an allein für die Dauern der am Bremsvorgang anteiligen Zeiten verantwortlich ist. Dabei wird er einzig durch die Grenze der theoretisch möglichen Vollverzögerung eingeschränkt, die – wie bereits oben beschrieben – über die Versuche hinweg konstant gehalten wird. Es kann daher zunächst festgehalten werden, dass, unabhängig von der bereits festgehaltenen Hypothese der über alle Bremssysteme und Betätigungsarten hinweg intraindividuell und interindividuell gleich hohen Vollverzögerung, auch die der Vollbremsphase vorangehenden Phasen einer Bremsung zumindest intraindividuell unabhängig

¹⁰⁴ Koch 2000: Vergleichstest Supersportler, S. 14ff

¹⁰⁵ Breuer et al. 2004: Bremsenhandbuch

vom verwendeten Bremssystem gleich lang sind, woraus Hypothese 9 und Hypothese 10 abgeleitet werden. Die der Vollbremsphase vorangehenden Phasen der Bremsung werden im Folgenden zusammengefasst und Einleitungsphase genannt.

Der Einzelanteil der in der Einleitungsphase zusammengefassten Phasen an einer etwaigen Variation der Dauer der Einleitungsphase ist

Hypothese 9: Die in der Einleitungsphase von den Testpersonen erzielte Verzögerung ist nicht vom verwendeten Bremssystem abhängig.

Hypothese 10: Die in der Einleitungsphase von den Testpersonen erzielte Verzögerung ist nicht von der Fahraufgabe abhängig.

unterschiedlich. Die Ansprechzeit der Bremse hängt in erster Linie vom Leerweg des Betätigungszyinders und vom Lüftspiel der Bremsbeläge ab, die Schwellzeit hängt vom möglichen Druckaufbaugradienten des Bremssystems ab. Wenn es trotz der Konstanthaltung der betroffenen Bremsenkomponenten über den Versuchen im Leerweg der Bremsbetätigungseinrichtung und im Lüftspiel der Bremsbeläge zu Abweichungen kommt, so finden diese aufgrund des Kriteriums für den Beginn einer Bremsung über eine Bremskraftschwelle keinen Eingang in die Versuchsergebnisse. Die möglichen Druckaufbaugradienten der verschiedenen Bremssysteme könnten sich jedoch unterscheiden. Eine qualitative Betrachtung zeigt, dass bei Bremssystemen mit ABS aufgrund der größeren Volumenaufnahme und der Beblendung der Druckstrecke tendenziell längere technisch bedingte Schwellzeiten zu erwarten sind¹⁰⁶. Die technische Schwellzeit einer Motorradbremse liegt um Größenordnungen unter der Betätigungszeit¹⁰⁷, sodass zunächst auf die Quantifizierung der möglicherweise unterschiedlichen Dauern der technisch begründeten Anteile der Schwellzeiten verzichtet wird. Aufgrund dieser Überlegungen wird eine getrennte Betrachtung der Ansprech- und Schwellzeiten zur Untersuchung des Fahrereinflusses auf die Bremsleistung nicht durchgeführt. Die Betätigungszeit kann aufgrund ihres dominierenden Zeitanteils und des Schwankungspotenzials der Zeitdauer als Ausschlag gebend für die Dauer der Einleitungszeit einer Bremsung bezeichnet werden¹⁰⁸.

Die Trennung zwischen Einleitungszeit und Vollbremszeit wird im idealisierten Geschwindigkeits/Zeit-Diagramm an der in Bild 14 dargestellten Stelle gezogen¹⁰⁹, an der die Ausgangsgeschwindigkeit aufgrund des Bremsvorgangs näherungsweise um die Hälfte des Produkts aus der Dauer der Einleitungsphase und der Vollverzögerung verringert ist. Die physikalischen Zusammenhänge lauten:

¹⁰⁶ Breuer et al. 2004: Bremsenhandbuch

¹⁰⁷ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung

¹⁰⁸ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremssysteme

¹⁰⁹ Breuer 2001: Motorradskript

$$\frac{\Delta v_{\text{einl}}}{\Delta v_{\text{voll}}} = \frac{t_{\text{einl}} \cdot a_{\text{einl}}}{t_{\text{voll}} \cdot a_{\text{voll}}} \quad (1.)$$

und:

$$\Delta v_{\text{einl}} + \Delta v_{\text{voll}} = v_0 \quad (2.)$$

Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 ist messtechnisch einfach zu ermitteln als die zu Beginn der Betätigung herrschende Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Schwellzeit, die Vollbremszeit oder die Vollverzögerung sind aus realen Bremsszenarien oft nicht konsistent ableitbar, wie das Beispiel in Bild 15 zeigt.

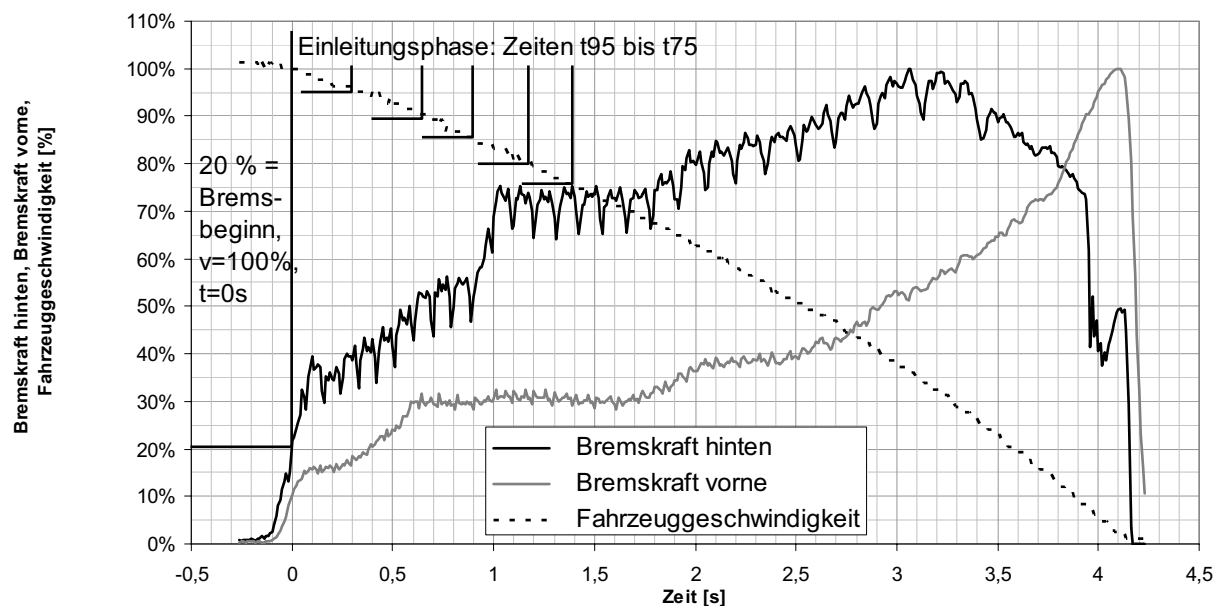


Bild 15: Geschwindigkeit (100 % => v_0) und Bremskräfte vorne und hinten jeweils auf die maximal aufgebraachte Bremskraft bezogen

Dargestellt ist eine Geradeausbremsung der Testperson 8 aus einer Sollgeschwindigkeit von 90 km/h. Der Verlauf der Geschwindigkeit über der Zeit lässt eine eindeutige Zuordnung von Schwellzeit und Vollbremszeit ebenso wenig zu wie die Bestimmung einer durchgehend stabilen Vollverzögerung. Unabhängig von der Messdateninterpretation erlaubt diese rein fahrzeugtechnische, für den Vergleich technischer Merkmale von Bremssystemen konzipierte Betrachtung keine von der Vollverzögerung unabhängige Bestimmung der Dauer der Einleitungsphase. Dies ist dem arbeitswissenschaftlichen intraindividuellen Vergleich zwischen Bremsungen mit verschiedenen Bremssystemen ebenso abträglich wie dem interindividuellen Vergleich. Da die Untersuchung der technischen Ausprägung verschiedener Bremssysteme nicht im Fokus dieser Arbeit steht, sondern eben diese technische Ausprägung konstant gehalten wird, ist es notwendig, ein anderes Kriterium zur Trennung zwischen Einleitungsphase der Bremsung und Vollbremsphase zu definieren. Arbeitswissenschaftlich betrachtet ist die Einleitung einer Bremsung definierbar als die Überführung des Fahrzeugs in einen eingeschwungenen Zustand maximaler Kraftschlussausnutzung durch den Fahrer. Entscheidend für

die Dauer der Einleitungsphase sind die Reaktionen des Bremssystems und des Fahrwerks (dynamische Radlastverschiebung) auf die Eingabe des Fahrers hin und auf die in dieser Arbeit vernachlässigte, weil aufgrund der makroskopisch ebenen Fahrbahn zu Null gesetzten Fußpunkterregung. Die Annäherung ist ein andauernder Regelkreis und ausschließlich von der fahrstabilen Seite aus möglich; das heißt, dass zumindest das Vorderrad nicht in die Blockade laufen darf, vgl. Kapitel 2.5. Dies unterscheidet die Einleitungsphasen der Bremsung von Einspurfahrzeug und Zweispurfahrzeug maßgeblich.

Im Versuchsbetrieb mit nicht als Versuchsfahrern ausgebildeten Testpersonen ist die unter Berücksichtigung der genannten fahrzeugtechnischen und arbeitswissenschaftlichen Aspekte definierte Trennung der Einleitungsphase der Bremsung und der Vollbremsphase durch Erreichen von 50 % der während einer Bremsung auftretenden maximalen Bremskräfte am Vorderrad oder Hinterrad nicht aufrecht zu erhalten. Dies hängt damit zusammen, dass manche Testpersonen trotz anders lautender Versuchsanweisung bereits bremsbereit mit leicht angelegten Belägen die Bremsung beginnen, andere erst gegen Ende der Bremsung über 50 % der dann kurz vor dem Stillstand des Fahrzeugs erreichten maximalen Bremskräfte am Vorderrad oder Hinterrad erreichen, vgl. Bild 15. Dies geschieht vor allem bei der Kurvenbremsung und ist eine Form des vorsichtigen Herantastens an die Reibwertgrenze, als Bremsung auch als „zu flach“ bezeichnet¹¹⁰. Also kann der Bremsbeginn nicht, wie es vom arbeitswissenschaftlichen und auch vom fahrzeugtechnischen Ansatz her sinnvoll wäre, auf den Beginn der Betätigung eines Bremshebels gelegt werden. Dies hätte zur Folge, dass ein eventuelles leichtes Betätigen eines der Bedienhebel im Vorfeld der eigentlichen Bremsung den Gesamtbremsweg und den Anteil der Einleitungsphase übermäßig erhöht, ohne dass dies kausal einer menschlichen Reaktion auf ein bestimmtes Bremssystem zuzuordnen wäre. Die Grenze zwischen der Einleitungsphase einer Bremsung und der Vollbremsphase an der 50 % Bremskraftschwelle festzumachen birgt ebenfalls die Gefahr der Verfälschung der Ergebnisse hin zu langen Einleitungsphasen vor allem bei den nicht blockiergesicherten Bremssystemen. Eine Situationsanalyse ergab, dass bei den vorliegenden Versuchen eine Schwelle von 20 % der während einer Bremsung vorne oder hinten aufgebrachten Bremskräfte sicher den Beginn einer Bremsung detektiert, vgl. Bild 15.

Die Trennung zwischen Einleitungsphase der Bremsung und Vollbremsphase gestaltet sich schwieriger: Es wird eine Einführung von in Bild 15 bereits eingetragenen Geschwindigkeitsschwellen gewählt, die in Prozent der Ausgangsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Bremsbeginns angegeben werden. Da die Festlegung auf eine bestimmte Prozentzahl arbeitswissenschaftlich oder technisch nicht konsistent begründbar ist, werden nachfolgend jeweils mehrere prozentuale Geschwindigkeiten mit Werten von 75 % bis 95 % in Schritten von 5 % angegeben. Dadurch kann abgeschätzt werden, in welchem Bereich sich beim Bremsen mit den jeweiligen Bremssystemen ein Ende der Einleitungsphase und der Beginn der Vollbremsphase abzeichnet.

¹¹⁰ Spiegel 1999: Mut zum Bremsen, S. 70

In Bild 16 und Bild 17 sind exemplarisch an der in Bild 15 bereits gezeigten Geradeausbremsung der erfahrenen Testperson 8 mit ca. 40.000 km Gesamtfahrerfahrung aus 90 km/h mit einem Standardbremssystem ohne Blockierverhinderer die relevanten Schwellen im Zeit- bzw. Wegbezug dargestellt. Eine Analyse dieser willkürlich aus der Menge der Geradeausbremsungen mit Standardbremse gewählten Bremsung zeigt den zögerlichen Aufbau der Verzögerung und somit unter Vernachlässigung der untergeordneten Einflüsse Luftwiderstand und Rollwiderstand den zögerlichen Bremskraftaufbau.

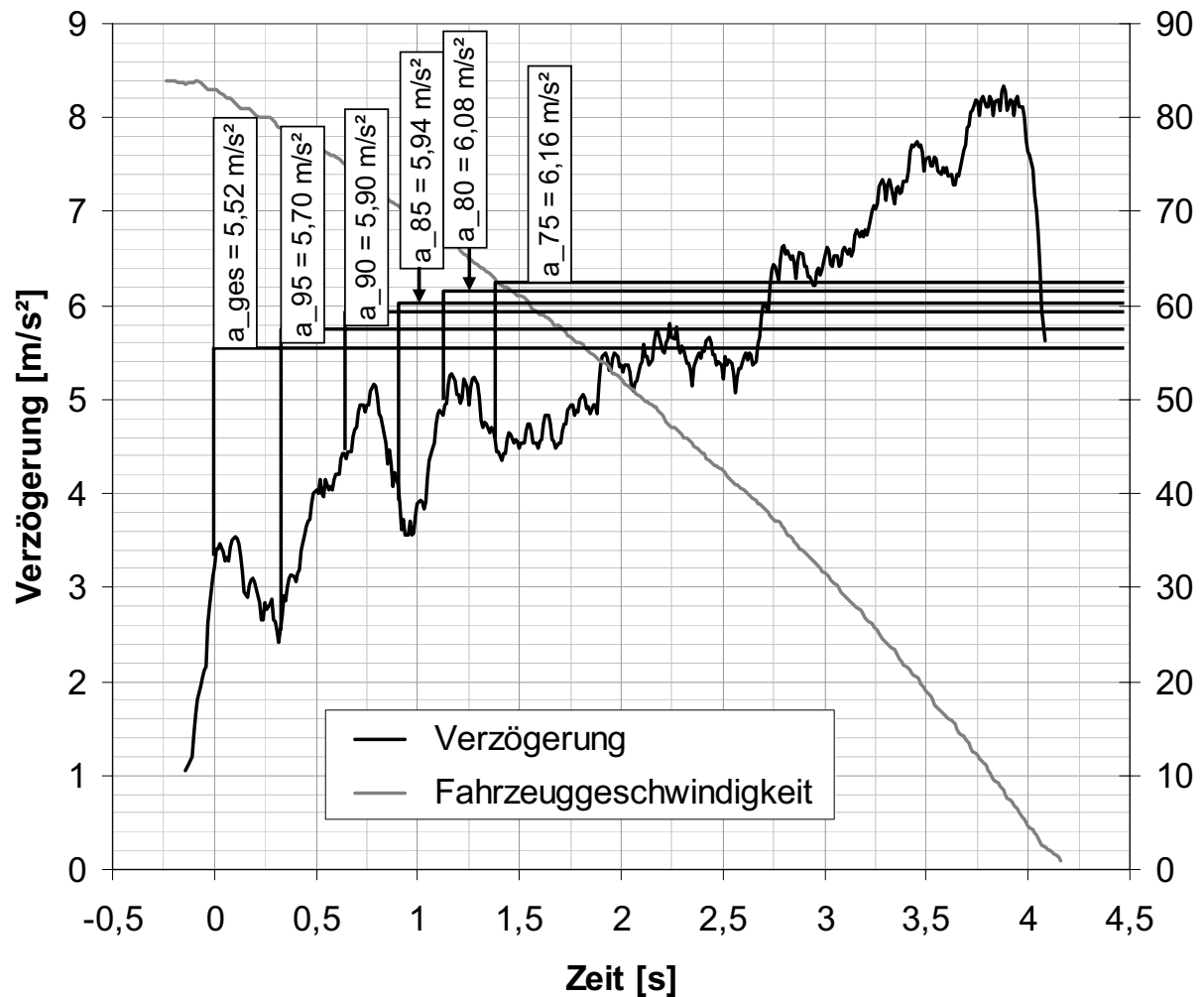


Bild 16: Verzögerung und Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit bei einer Geradeausbremsung einer sehr erfahrenen Testperson (Testperson Nr. 8) aus nominal 90 km/h mit einer Standardbremse (Bremsituation Nr. 278)

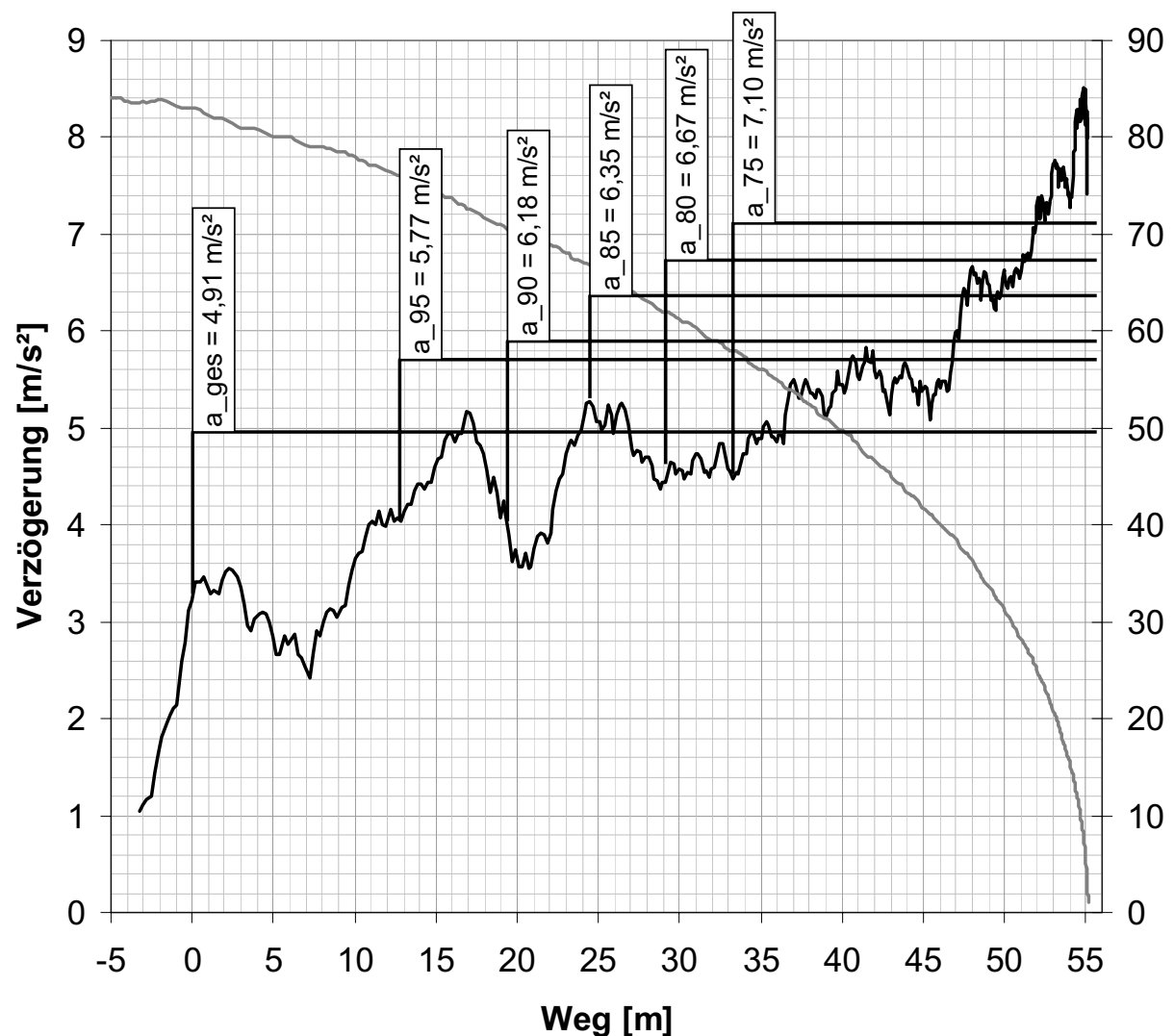


Bild 17: Verzögerung und Fahrzeuggeschwindigkeit über dem Weg bei einer Geradeausbremsung einer sehr erfahrenen Testperson (Testperson Nr. 8) aus nominal 90 km/h mit einer Standardbremse (Bremsituation Nr. 278)

Eine parallele Betrachtung der im vorliegenden Fall der Standardbremse vom Fahrer im Rahmen des Kraftschlussangebots frei wählbaren Bremskraftverteilung während dieser Bremsung zeigt einen zu zurückhaltenden Einsatz der Vorderradbremse, vgl. Bild 15. Über lange Phasen der Bremsung wird dort nur das Hinterrad an die Blockadegrenze herangeführt. Erst bei einer absoluten Fahrzeuggeschwindigkeit von deutlich unter 50 km/h steigert der Fahrer die Bremskraft merklich, s. Bild 18, das Vorderrad wird erst kurz vor dem Stillstand des Motorrads an die Reibwertgrenze herangeführt. Entsprechend lang fällt der Bremsweg aus, der aus real 83 km/h über 55 m beträgt. Diese Bremsung bleibt also mit 5,52 m/s² über der Zeit gemittelten Verzögerung bzw. 4,94 m/s² über dem Weg gemittelten Verzögerung weit unter dem Reibwertangebot zwischen Reifen und Straße und auch unter der gesetzlich vorgegebenen, über dem Weg gemittelten Mindestverzögerung einer Bremsanlage, vgl. Kapitel

1.2.3. Subjektiv hingegen hat dieser Fahrer die während der Bremsung erreichte Verzögerung als sehr hoch eingeschätzt. Der aus dem unstetigen Verlauf der unmittelbar vor dem Stillstand hohen Verzögerung resultierende Ruck als zeitliche Ableitung der Verzögerung vermittelt dem Fahrer den subjektiv dominierenden Eindruck über die während der Bremsung erreichte Verzögerung.

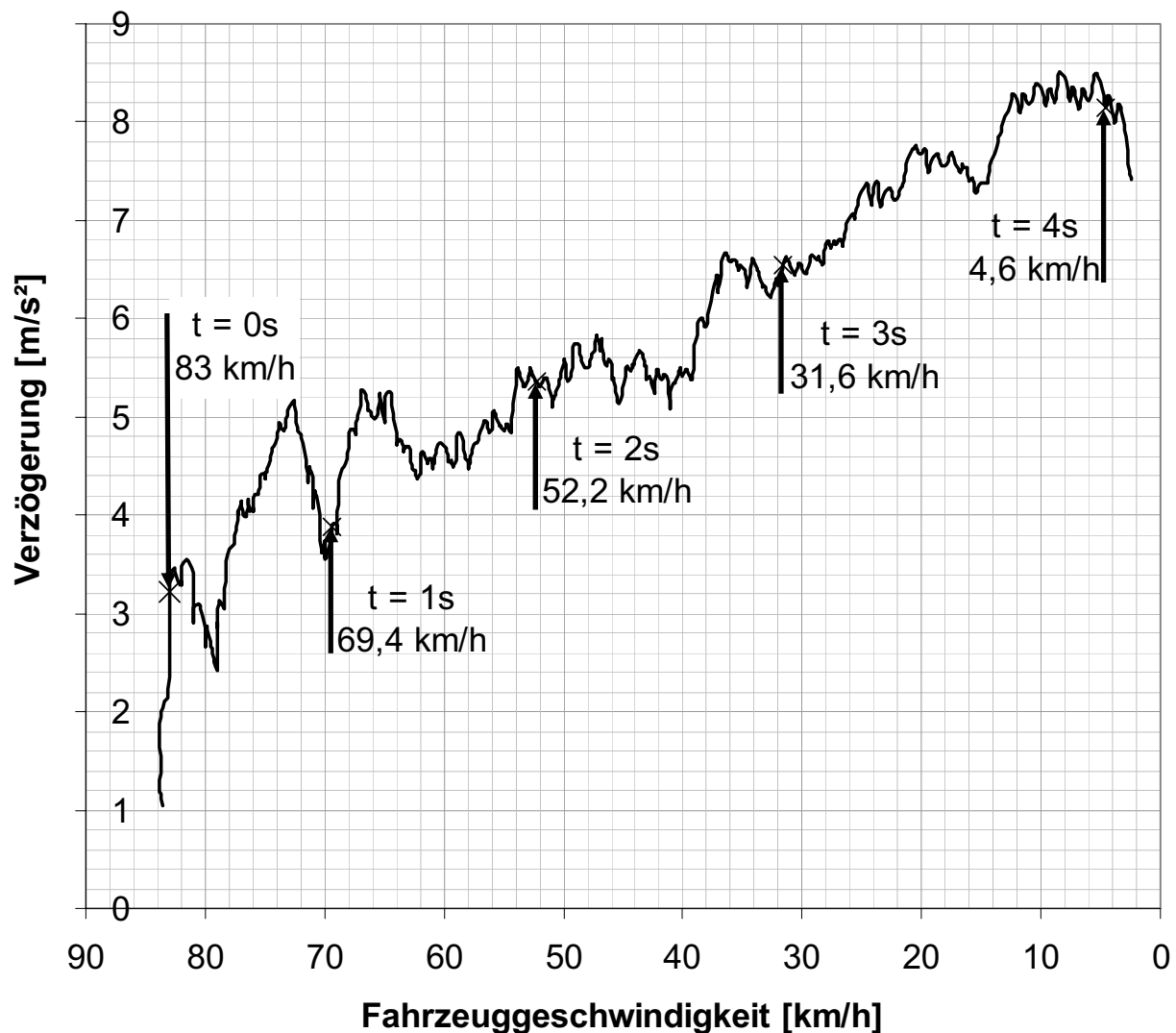


Bild 18: Verzögerung über der Fahrzeuggeschwindigkeit bei einer Geradeausbremsung einer sehr erfahrenen Testperson (Testperson Nr. 8) aus nominal 90 km/h mit einer Standardbremse (Bremsituation Nr. 278)

Hinsichtlich der technischen Voraussetzungen der Betätigungseinrichtung und der Bremsmittel besteht Grund zur Annahme, dass zum Erreichen der prozentual festgelegten Geschwindigkeitsschwellen bei den verschiedenen Bremssystemen Kombinations- und Standardbremse jeweils mit ABS längere Zeiten benötigt werden als ohne ABS, wie in diesem Kapitel auf Seite 35 hergeleitet. Es besteht demnach auch eine mögliche technische Begründung für eine Annahme dahingehend, dass bei Erreichen der vorab als Bremsbeginn definierten

20 %-Bremskraftschwelle bei Bremssystemen mit ABS aufgrund deren tendenziell geringeren Druckaufbaugradienten geringere Fahrzeuggeschwindigkeiten vorliegen könnten als bei Bremssystemen ohne ABS.

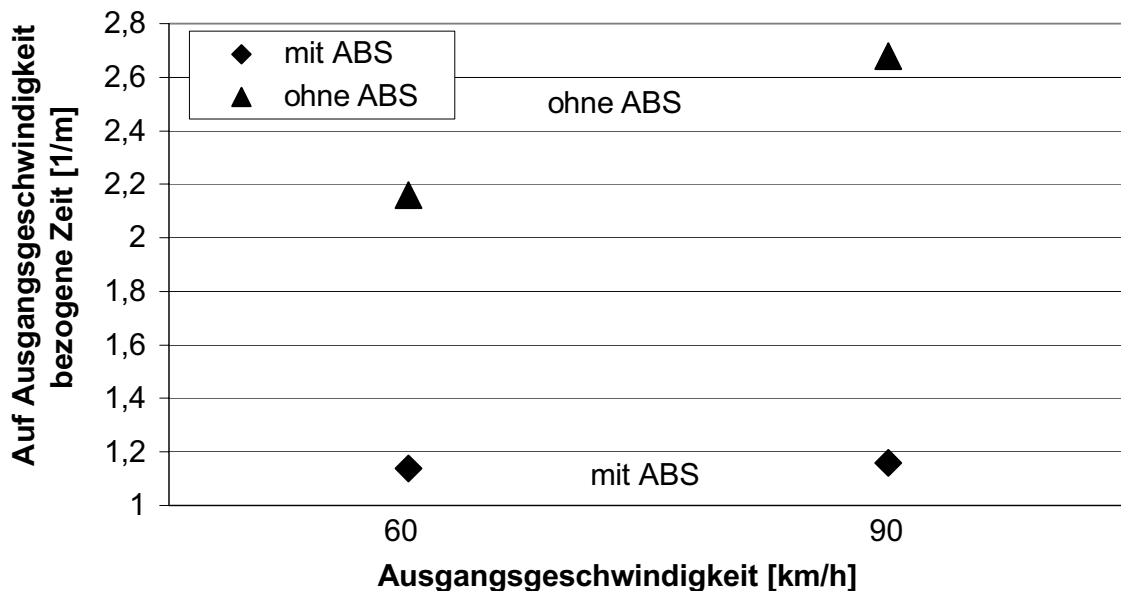


Bild 19: Auf Ausgangsgeschwindigkeit bezogene Zeitdauer vom Beginn der Bremsung bis zum Erreichen von 90 % der Ausgangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit¹¹¹

Die Weitergabe des Bremsdrucks von der Betätigungseinrichtung an die Bremssättel ist bei Bremsdrücken in der Größenordnung des Bremskolbenverschiebedrucks maßgeblich geprägt von einer Volumenverschiebung der Bremsflüssigkeit. Die mit ABS ausgestatteten Bremssysteme stellen dieser Volumenverschiebung aufgrund der höheren Anzahl an Drosselstellen im System in Verbindung mit der endlichen Viskosität der Bremsflüssigkeit tendenziell mehr Widerstand entgegen als die Bremssysteme ohne ABS. Es wird also überprüft werden, ob die bis zum vorab als Einleitungsphase definierten Erreichen der gestaffelten prozentualen Geschwindigkeitsklassen erzielte Bremsleistung wie vermutet bei Bremssystemen ohne ABS nicht länger als bei Bremssystemen mit ABS ist, s. Hypothese 9. Des weiteren wird wie dargelegt überprüft werden, ob die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit zum in dieser Arbeit definierten Bremsbeginn bei Erreichen von 20 % der während einer Vollbremsung maximal auftretenden Vorderradbremskraft bei gleicher vorgegebener Ausgangsgeschwindigkeit bei Bremssystemen mit und ohne ABS unterschiedlich groß ist. Vom Bremssystem unabhängige Einfahrtgeschwindigkeiten sind eine Voraussetzung zur uneingeschränkten Vergleichbarkeit der verschiedenen Bremssysteme, da der Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit auf die Verzögerungsanteile in seiner Höhe und auch in seinem Gradienten vom verwendeten Bremssys-

¹¹¹ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremssysteme, S. 21

tem abhängig ist: Die verstrichenen Zeiten zwischen Bremsbeginn und dem Erreichen von 90 % der Ausgangsgeschwindigkeit steigen bei nicht blockiergeschützten Bremsen überproportional stark mit der Geschwindigkeit an, während dieselbe Größe bei blockiergeschützten Bremsen nicht nur deutlich geringer ist, sondern auch unabhängig von der Geschwindigkeit ist, s. Bild 19. Es werden also vorab die Ausgangsgeschwindigkeiten der Testpersonen mit verschiedenen Bremssystemen überprüft.

Im Anhang (Kap. 6.1) sind die ermittelten und ausgewerteten Einfahrtgeschwindigkeiten dargestellt. Zwischen den Bremssystemen ist bei gleicher Geschwindigkeitsvorgabe hinsichtlich der tatsächlichen Einfahrtgeschwindigkeiten kein Unterschied feststellbar.

Die Verzögerungsverläufe der Einleitungsphase und der Vollbremsphase – unabhängig von ihrer Definition über eine Geschwindigkeitsschwelle oder über andere Kriterien – sind technisch begrenzt vom System Bremse/Fahrwerk/Reifen/Fahrbahn. Der Fahrer eines Motorrads hält zu dieser technischen Grenze einen mehr oder weniger großen Abstand, dessen Betrag laut oben aufgestellter Hypothese unabhängig vom verwendeten Bremssystem gleich groß ist.

2.8 Aufstellung der Arbeitshypothesen

Zusammenfassend seien nachfolgend die in diesem Kapitel entwickelten Hypothesen in chronologischer Reihenfolge aufgezählt:

Hypothese 1: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen sind bei allen Fahraufgaben gleich groß.

Hypothese 2: Bei Bremsungen mit ABS sind die von den Testpersonen erzielten Bremsleistungen nicht von deren Gesamtfahrerfahrungen abhängig.

Hypothese 3: Die von den Testpersonen erzielten, über der Zeit gemittelten Verzögerungen mit und ohne ABS unterscheiden sich nicht.

Hypothese 4: Die von den Testpersonen mit Standardbremssystem ohne ABS erzielten Bremsleistungen sind größer als die mit Kombinationsbremssystem ohne ABS erzielten.

Hypothese 5: Die von den Testpersonen mit dem zweihebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem erzielten Bremsleistungen sind gleich denen mit dem einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem erzielten.

Hypothese 6: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit und ohne ABS sind gleich groß.

Hypothese 7: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit einem Standardbremssystem ohne ABS sind niedriger als die bei der Versuchsdurchführung mit einem Kombinationsbremssystem ohne ABS.

Hypothese 8: Die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit einem zweihebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem sind ge-

nau so hoch wie die bei der Versuchsdurchführung mit einem einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem.

Hypothese 9: Die in der Einleitungsphase von den Testpersonen erzielte Verzögerung ist nicht vom verwendeten Bremssystem abhängig.

Hypothese 10: Die in der Einleitungsphase von den Testpersonen erzielte Verzögerung ist nicht von der Fahraufgabe abhängig.

3 Versuchsgestaltung

3.1 Versuchsdurchführung und Versuchsstrecke

Versuche bezüglich der Wechselwirkungen zwischen der Art des Bremssystems, der Fahrweise und den Bremsleistungen von Motorradfahrern im öffentlichen Straßenverkehr durchzuführen ist aufgrund der Realitätsnähe Versuchen auf abgesperrtem Versuchsgelände vorzuziehen¹¹². Allerdings ist dort eine statistisch relevante Anzahl an Bremsungen nur durch eine exzessive Fahrversuchsgesamtdauer erreichbar. Untersuchungen kritischer Situationen im Straßenverkehr werden daher auch als nicht praktikabel bezeichnet¹¹³. So kommt es nur selten zu einer verkehrsinduzierten Vollbremsung. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen dem Willen und dem Können des Fahrers, eine hohe Verzögerung aufzubringen, schwierig, wenn nicht gar unmöglich.

Aus diesen Überlegungen heraus und aus Sicherheitsgründen wurden Fahrversuche auf abgesperrtem Gelände mit definierter Aufgabenstellung und inter- und intraindividuell vergleichbaren Umgebungsbedingungen durchgeführt.

Die Versuche sollen Standard-Bremssituationen aus dem realen Verkehrsgeschehen abbilden. Versuche mit extremen Randbedingungen, beispielsweise aus sehr hohen Geschwindigkeiten, werden höchstwahrscheinlich interindividuelle Unterschiede und Unterschiede im Umgang der Testpersonen mit verschiedenen Bremssystemen besser herausarbeiten¹¹⁴, sind aber aus Sicherheitsgründen und Gründen der Übertragbarkeit auf das reale Verkehrsgeschehen abzulehnen. Die üblichen Ausgangsgeschwindigkeiten bei Verkehrsunfällen sind deutlich geringer als gemeinhin angenommen¹¹⁵, vgl. Kapitel 1.3. Die Wahl fiel auf Geradeausbremsungen bei einer für die Fahrt auf einer europäischen Überlandstraße typischen Geschwindigkeit von 90 km/h und einer im städtischen Ballungsraum oder auf engen, kurvigen Landstraßen üblichen Geschwindigkeit von 60 km/h. Die Mehrzahl der Motorradunfälle findet auf Landstraßen statt¹¹⁶.

¹¹² Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 41

¹¹³ Schell 2002: Untersuchungen zur Mensch Maschine Schnittstelle am motorisierten Zweirad

¹¹⁴ Wagner 2000: Bremssystem für Zweiradfahrzeuge, S. 251

¹¹⁵ Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In Depth Accident Study, S. 45

¹¹⁶ Assing 2002: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern

Weiterhin soll eine Kurvenbremsung durchgeführt werden. Die Kurvenbremsung wird als eine der größten Herausforderungen des Fahrers beim Motorradfahren beschrieben^{117,118,119}. Die Randbedingungen hierfür sind aus Sicherheitsgründen geringe kinetische Energien, eine Ausgangsgeschwindigkeit oberhalb der dynamischen Eigenstabilisierungsgrenze von Motorrädern¹²⁰ und ein Rollwinkel, der innerhalb der vom Menschen aus natürlichen Abläufen her bekannten Grenze von 20° ¹²¹ liegt, damit es jeder Testperson, auch der wenig geübten, ohne weiteres möglich ist, diesen Versuch durchzuführen. ABS kann den Fahrer bei dieser Aufgabe unterstützen; es wird jedoch auch beschrieben¹²², dass ABS im Bereich des Grenzrollwinkels unter Umständen einen Sturz aufgrund der Bremsung nicht verhindern kann. Des Weiteren induzieren die Bremsmomentschwankungen vor allem des Vorderrads Schwankungen im Bremslenkmoment^{123,124}. Aus den genannten Anforderungen heraus wurde festgelegt, dass die Kurvenbremsung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h auf einem Kurvenradius von 50 m durchgeführt werden soll. Die Parameter Ausgangsgeschwindigkeit und Kurvenradius wurden aus dem Kompromiss aus möglichst niedrigen kinetischen Energien und einem gut fahrbaren Kurvenradius ausreichend weit oberhalb der Selbststabilisierungsgrenze des Motorrads gebildet. Dies entspricht rechnerisch mit

$$a_q = \frac{v^2}{r} \quad (3.)$$

einer Querbeschleunigung von $3,86 \text{ m/s}^2$ und aus

$$\lambda_{th} = \arctan\left(\frac{a_q}{g}\right) \quad (4.)$$

einem theoretischen Rollwinkel von $21,4^\circ$. Bei der Durchführung der Versuche wurden die meisten Kurvenbremsungen mit einer geringeren als der Sollgeschwindigkeit durchgeführt, und meist wurde im Verlauf der Bremsung der gefahrene Radius vergrößert, so dass die realen Querbeschleunigungen und Rollwinkel geringer ausfielen als die theoretischen Werte. Fahrzeugtechnisch ist eine Bremsung mit 20° theoretischem Rollwinkel bei den während der Versuchsdurchführungen vorherrschenden Reibwerten zwischen Reifen und Fahrbahn durch die äußerst geringe Einschränkung der Längskraftbeanspruchung ähnlich einer Geradeaus-

¹¹⁷ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 177

¹¹⁸ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 24

¹¹⁹ Toyofuku et al. 1994: Effects of motorcycle ABS for skilled and less-skilled riders, S. 223-228

¹²⁰ Breuer 2001: Motorradsript

¹²¹ Spiegel 1989: Mesokosmos, S. 7

¹²² Stoffregen 1999, S. 342

¹²³ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 177

¹²⁴ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 24

bremsung. Der Kammsche Kreis für die dargestellte Kurvenbremsung zeigt, dass in der Tat auch bei der in den vorliegenden Versuchen verwendeten nassen Fahrbahn ein Längsbeschleunigungspotenzial annähernd in der gleichen Höhe wie bei der Geradeausbremsung vorhanden ist, s. Bild 20.

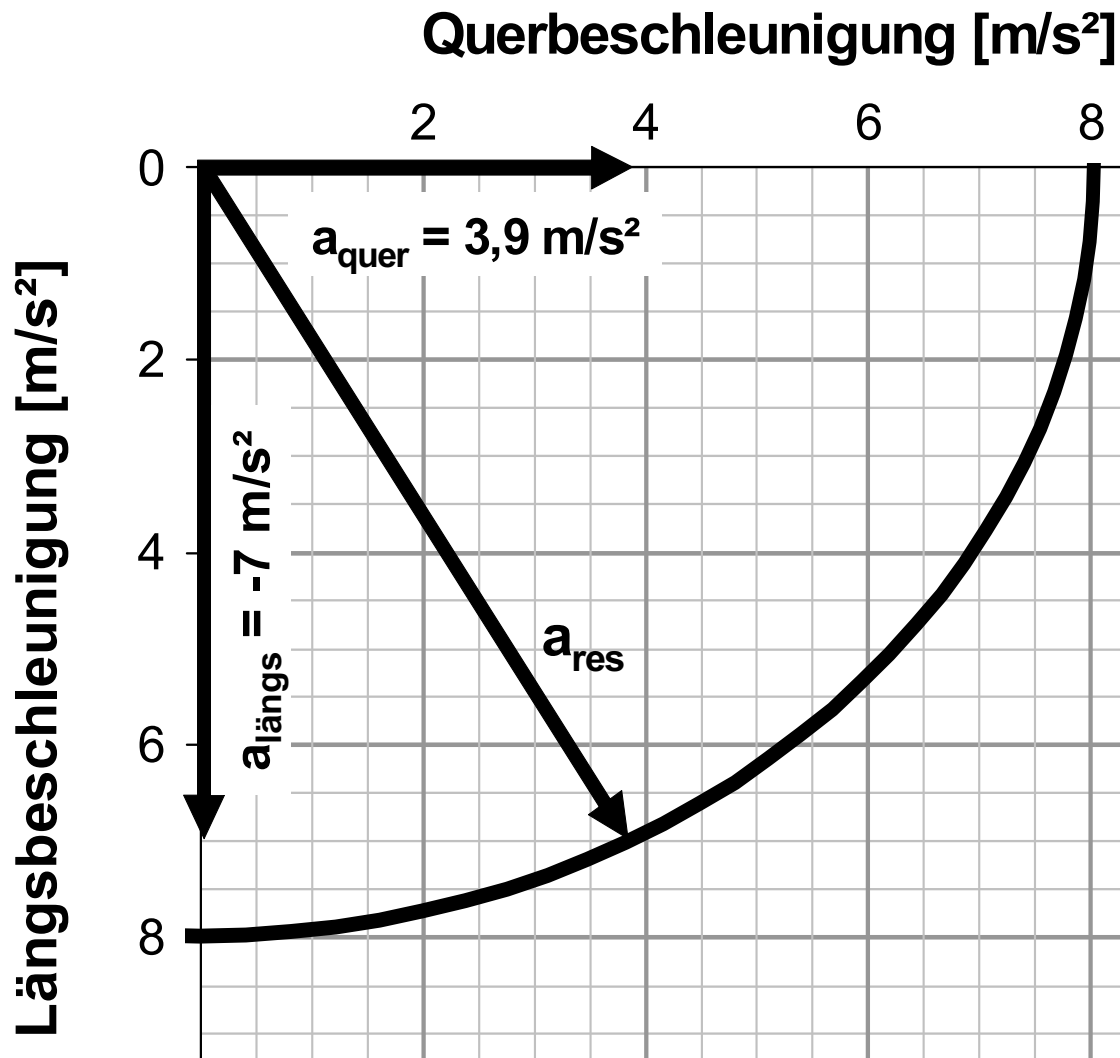


Bild 20: Ausgangssituation der Kurvenbremsung mit maximal möglicher Längsbeschleunigung im Kammschen Kreis, Annahme $\mu_{\text{längs}} = \mu_{\text{quer}} = 0,8$

Die Kurvenbahn wird der Testperson durch in der Innenkurve liegenden, mit der Kegelspitze zur Außenkurve weisenden Pylonen angezeigt. Ein Pylonentor weist auf den Beginn der in den Kurvenradius führenden Klotheide hin, die Testperson kann den Anfang der Bremsung innerhalb der gekennzeichneten Kurve frei wählen und hat damit eine gegenüber den Geradeausbremsungen erhöhte Freiheit der Wahl des Bremsbeginns.

Die Einzelversuche sind auf einer ebenen Strecke, der Startbahn des ehemaligen August-Euler-Flugplatzes und jetzigen Versuchsgeländes der TU Darmstadt angeordnet, s. Bild 21. Die Windgeschwindigkeit lag zu jedem Versuchszeitpunkt unter 5 m/s, und die Lufttemperatur lag über 4°C.

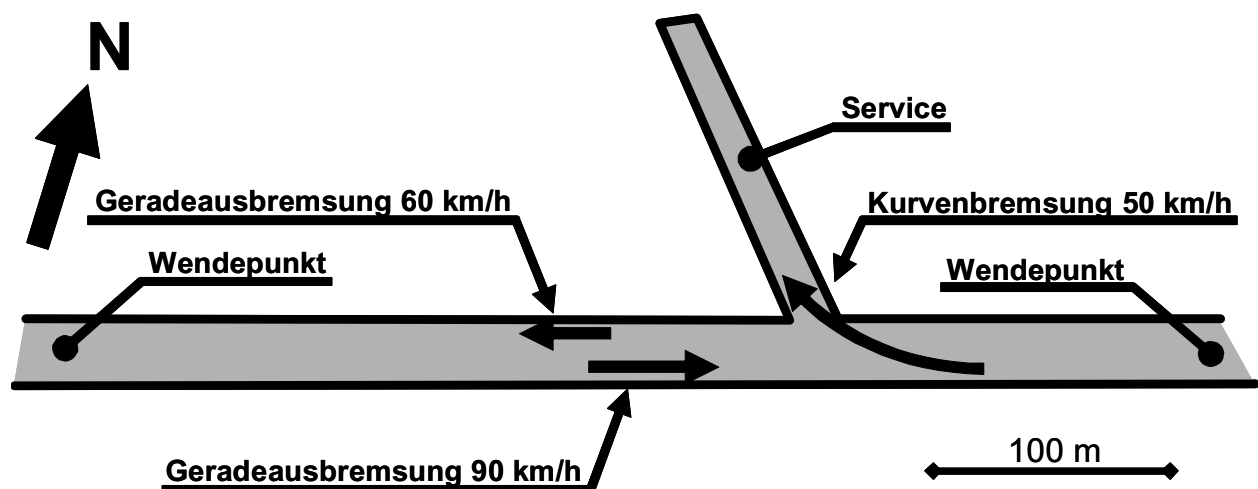


Bild 21: Maßstäbliche Skizze des Versuchsaufbaus mit eingezeichneten Bremsversuchen und Wende- und Servicepunkten

Zunächst soll ein kurzer Überblick über die Versuchsdurchführung gegeben werden: die Testperson wird zunächst an der Versuchsstrecke mit physiologischer Messtechnik ausgestattet. Die Testperson bekommt den zeitlichen Ablauf der Versuche erklärt und füllt einen FRF-Fragebogen zum Risikoverhalten¹²⁵, einen d2-Konzentrationstest¹²⁶ und einen Kurzfragebogen zur Befindlichkeit¹²⁷ aus. Die Testperson bekommt die Fahraufgabe „Erzielen Sie möglichst kurze Bremswege“ sowie die Information, welches Bremssystem eingestellt ist und führt die Bremsversuche mit dem ersten eingestellten Bremssystem durch. Die Testpersonen durchlaufen die Versuchsabfolge

- Geradeausbremsung mit 60 km/h,
- wenden,
- Geradeausbremsung mit 90 km/h,
- wenden,
- Kurvenbremsung

mit jedem Bremssystem sieben Mal, bevor sie nach der letzten Kurvenbremsung an die Servicestation fahren.

Nach diesem ersten Versuchsdurchlauf füllt die Testperson einen weiteren Kurzfragebogen zur Befindlichkeit aus, während am Motorrad das Bremssystem umgestellt wird. Mit der Information über das Bremssystem führt die Testperson die nächste Versuchsreihe durch und so weiter bis zur fünften und letzten Versuchsreihe. Nach Abschluss der Versuche bearbeitet die Testperson den sechsten und letzten Befindlichkeits-Kurzfragebogen und einen weiteren

¹²⁵ Schmidt 1985: FRF-Fragebogen

¹²⁶ Brickenkamp 1975: d2-Test

¹²⁷ Kerwien et al. 2000: Subjektive Sicherheit bei Rennstreckentrainings

d2-Test. Damit beträgt die während der Versuche zurückgelegte Gesamtstrecke zwischen 42 km und 50 km je nach Wendeverhalten der Testpersonen.

Grundlage der Versuche ist eine ceteris paribus Versuchsdurchführung, bei der – abgesehen von dem am Versuchsmotorrad eingesetzten Bremssystem – alle anderen Parameter unverändert bleiben. Zu diesen anderen Parametern zählt insbesondere auch die Fahrbahnoberfläche, die aus der Vorgabe heraus eine optisch nasse Asphaltbetanoberfläche sein soll. Für den Reibwert vorrangig relevant sind die Fahrbahntextur und die Fahrbahn- und Reifentemperatur. Während einer Versuchsdurchführung wurde die Fahrbahn zwischen zwei Versuchen mit einem Sprengwagen bewässert. Die Bewässerung begann jeweils ca. 10 m vor den markierten Bremspunkten und endete nach ca. 70 m bis 100 m. Die exakte Lage der Bremspunkte war auf der Versuchsstrecke dauerhaft vermerkt und während der Versuche mit einem Pylonentor angezeigt. Die Fahrbahntextur der nicht unter Verkehr liegenden Versuchsstrecke kann über den Versuchszeitraum von ca. acht Monaten als unverändert angenommen werden. Vor jedem Versuchszyklus wurde die Fahrbahn mit einer Kehrmachine gereinigt¹²⁸. Die Lufttemperatur lag bei der Durchführung der Versuche zwischen 4°C und 16°C. Eine solche Temperaturspanne hat Untersuchungen zufolge keinen nachweisbaren Einfluss auf den Reibbeiwert¹²⁹.

Um einen Ausfall des ABS wegen Unterspannung zu verhindern (vgl. Kapitel 3.2.1), wurden die Wendezonen weiter von den Versuchszonen entfernt ausgezeichnet als für die Versuchsdurchführung notwendig. So kann die Lichtmaschine ausreichend durch die ABS-Regelungen verbrauchte elektrische Energie zurückfördern.

Tabelle 2: Verwendete Permutationen zur Vermeidung von Artefakten

Permutation A	Permutation B	Permutation C
Standardbremse	Kombibremse mit ABS	Kombibremse
Kombibremse	Standardbremse mit ABS	Kombibremse mit ABS, nur ein Bedienelement
Standardbremse mit ABS	Standardbremse	Kombibremse mit ABS
Kombibremse mit ABS	Kombibremse mit ABS, nur ein Bedienelement	Standardbremse
Kombibremse mit ABS, nur ein Bedienelement	Kombibremse	Standardbremse mit ABS

¹²⁸ Reichel 2003: Einfluss stufenlos verstellbarer Schwingungsdämpfer, S. 73

¹²⁹ Schmieder et al. 1994: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen, S. 21

Um Artefakte auszuschließen, wurden die Versuchsnummer und die Abfolge der Bremssysteme durchpermutiert. Es wurden Permutationen gefunden, die sicherstellten, dass weder zwei Bremssysteme in der gleichen Reihenfolge vorkommen, noch dass ein Bremssystem an der gleichen Stelle der Versuchsreihenfolge steht. Bei fünf verschiedenen Bremssystemen bleiben, ausgehend von einer festgelegten Reihenfolge, exakt drei mögliche Permutationen, die diese Anforderungen erfüllen. Sie sind in Tabelle 2 aufgeführt und wurden während der Versuche zu gleichen Teilen angewendet.

Die Ermittlung der physiologischen Ruhedaten als Basis für die Arbeitsherzschlagfrequenz wurde zwischen den Versuchen bei der Bearbeitung des Befindlichkeits-Kurzfragebogens durchgeführt. Vor den Versuchen ist die Herzschlagfrequenz der Testperson in der Regel höher aufgrund der psychischen Beanspruchung durch die Ungewissheit des auf die Testperson zukommenden Ereignisses¹³⁰.

In Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass die Testpersonen die beste individuelle Bremsleistung innerhalb der ersten sieben Bremsungen erzielen konnten und somit ein erstes Lernplateau erreicht wird. Nicht untersucht wurden Lernkurven mit mehr als 15 aufeinander folgenden Bremsversuchen. Es ist daher durchaus möglich und sogar höchstwahrscheinlich¹³¹, dass dieses lokale Maximum bei mehr als 15 aufeinander folgenden Bremsversuchen übertroffen wird und die Bremsleistung weiter gesteigert werden kann.

3.2 Versuchswerkzeuge

3.2.1 Versuchsfahrzeug

Zur Darstellung der verschiedenen Bremssysteme kann man entweder Motorräder als Versuchsfahrzeuge auswählen, die diese Bremssysteme serienmäßig verbaut haben, oder es werden alle Bremssysteme in einem Versuchsfahrzeug realisiert. Die mit verschiedenen Versuchsmotorrädern erhaltenen Versuchsergebnisse sind jedoch nicht nur vom Bremssystem an sich abhängig, sondern auch von vielen anderen fahrzeugseitigen und ergonomischen Gegebenheiten der verschiedenen Fahrzeuge. So wären die Bremskinematik und hier insbesondere die Lage des Nickpols und damit der kinematische Bremsnickausgleich als Maß für die Neigung eines Fahrzeugs zur dynamischen Vorderradüberbremsung zu nennen, die Übersetzung der Bremsanlage, die entsprechende Haptik der Bedienelemente, die Überschlagneigung des Motorrads, die Sitzposition des Fahrers, die zwangsläufig verschiedenen Reifen und andere Einflussfaktoren, deren Einfluss auf die Bremsleistung der Testpersonen in der Summe Größenordnungen erreichen kann, die das Versuchsziel des Vergleichs der Belastung und Bean-

¹³⁰ Bokranz et al. 1991: Einführung in die Arbeitswissenschaft, S. 208

¹³¹ Horaz: De arte poetica, 361: „Repetitio est mater studiorum“

spruchung von Testpersonen auf verschiedene Bremssysteme gefährden würden. Daher bleibt, wie bei anderen Aspekten dieser Versuche, nur die strikte Einhaltung der Gleichhaltung aller nicht beachteten möglichen Einflussparameter *ceteris paribus*. Über den Versuch hinweg ändert sich die Masse des Motorrads um den während des Versuchs verfahrenen Kraftstoff. Während eines kompletten Versuchs verbrauchte das Versuchsmotorrad zwischen 8 l und 10 l Kraftstoff, was einer Masse von 5,7 kg bis 7,2 kg entspricht und somit in jedem Fall unter 2 % der unter vereinfachenden Annahmen theoretisch ohne Einfluss bleibenden Gesamtmasse von Testperson und Versuchsmotorrad ausmacht. Es wurde ein Versuchsfahrzeug ausgewählt, welches möglichst bereits serienmäßig mit einem blockiergesicherten Kombinationsbremssystem ausgestattet ist und ausreichend Platz bietet für die für die Versuche nötige Messtechnik.



Bild 22: Versuchsfahrzeug BMW R1150RT mit Umsturzvorrichtung sowie integrierter und abgedeckter Messtechnik

Die BMW R1150RT, s. Bild 22, bot sich in diesem Zusammenhang an als ein mit dem BMW Vollintegralbremssystem ausgestattetes Motorrad, dessen Vorgängermodell BMW R1100RT mit ähnlicher Fahrwerkskonfiguration mit einem Standardbremssystem mit ABS ausgestattet ist. In einer BMW R1150RT wurde also parallel zum serienmäßigen Integral ABS das ABS II

des Vorgängermodells verbaut. Über Ventile kann von den Bedienelementen Hand- und Fußbremshebel entweder das Standard- oder das Kombinationsbremssystem angesteuert werden, und über Ausgabekanäle der Messdatenerfassung können die ABS-Funktionen abgeschaltet werden, s. Anhang (Kap. 6.2). Beim BMW Integral ABS wurde dies derart realisiert, dass die Bremskraftverstärkung auch bei ausgeschaltetem ABS weiterhin aktiv ist. Der Fußbremshebel ist abnehmbar gestaltet, um eine Einhebel-Bedienung des blockiergesicherten Kombibremssystems darzustellen. Es bleibt festzuhalten, dass damit, abgesehen vom leicht erhöhten Bremsbetätigungskraftniveau der Standardbremse gegenüber dem Kombinationsbremssystem, die vorgenannten ergonomischen und fahrzeugtechnischen Einflussparameter konstant gehalten werden können.

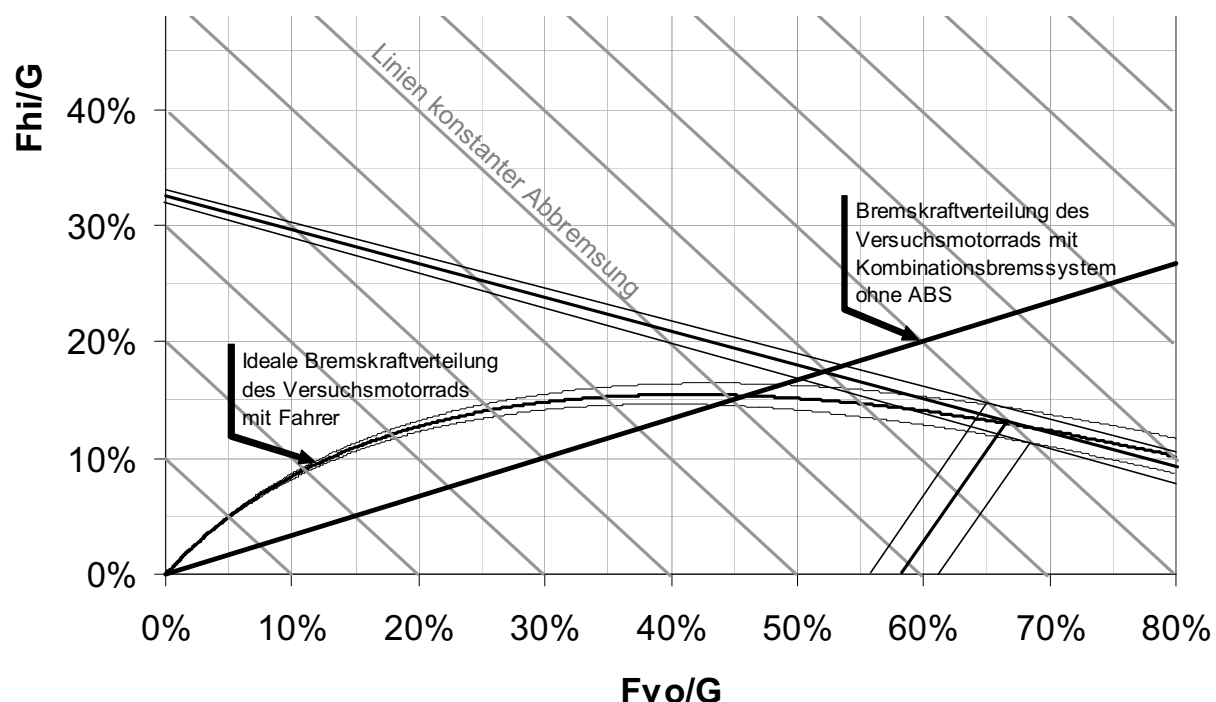


Bild 23: Ideale Bremskraftverteilung des Versuchsmotorrads mit Fahrer und reale Bremskraftverteilung des Kombinationsbremssystems ohne ABS; ideale Bremskraftverteilung und Reibwertgrenzen mit aus der Schwerpunktvermessung herrührenden Fehlerbalken, s. 6.3

Unter Berücksichtigung der wirksamen Reibdurchmesser und der Bremskolbendurchmesser verteilt die fest eingestellte Bremskraftverteilung der Kombinationsbremse des Versuchsmotorrads unter der Voraussetzung gleicher Reibwerte und Wirkungsgrade in der vorderen und hinteren Bremsanlage nach eigenen Berechnungen etwa 75 % der Bremskraft auf den Latsch des Vorderreifens und 25 % auf die hintere Reifenauflandsfläche. Bis zu einer Abbremsung von etwa 50 % ist dadurch das Vorderrad überbremst, was im Zusammenspiel mit dem annähernd vollständigen kinematischen Bremsnickausgleich des Versuchsmotorrads im Rahmen des bei den Versuchen herrschenden Kraftschlussangebots nicht zu einer Vorzeitigkeit der Vorderradblockade gegenüber der Hinterradblockade führt. Bild 23 zeigt die ideale

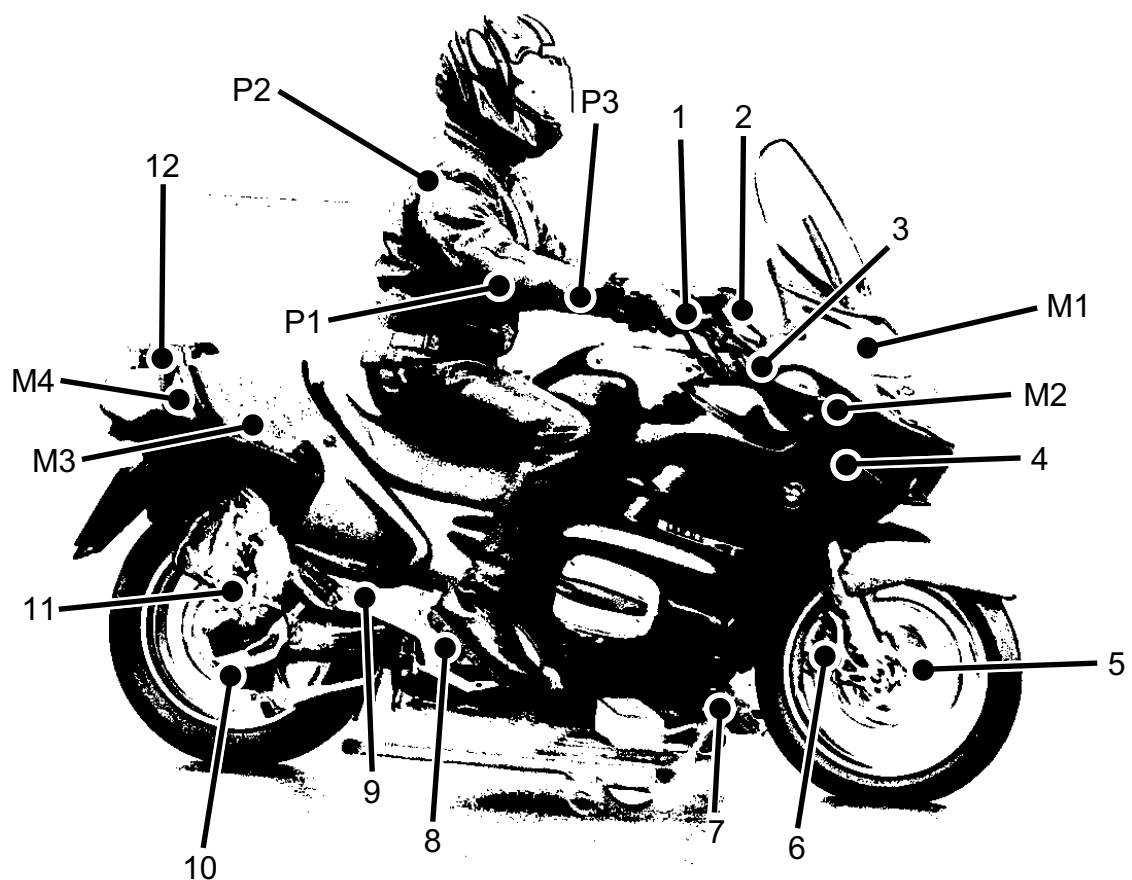
Bremskraftverteilung des Versuchsmotorrads mit einem durchschnittlichen Fahrer und die von den konstruktiven Parametern vorgegebene Bremskraftverteilung.

Es ist also trotz der zwar richtlinienkonformen, jedoch im realen Straßenverkehr aufgrund der Möglichkeit des Vorkommens niedriger Reibbeiwerte zwischen Reifen und Fahrbahn nicht praktikablen Bremskraftverteilung der nicht blockiergesicherten Versuchs-Kombinationsbremsanlage über die definierten Versuchsbedingungen gewährleistet, dass das Hinterrad jederzeit vor dem Vorderrad in die Blockade läuft.

Das Versuchsmotorrad ist weitgehend unsichtbar mit Messtechnik ausgestattet worden. Es wurden mehrere Messtechniknoten installiert, die via CAN-Bus miteinander verbunden sind. Die Messdatenaufzeichnung konnte im Radiofach des Versuchsmotorrads unsichtbar verstaut werden, ein Teil der Messdatenerfassung ist vorne in kleinen Package-Lücken der Verkleidung untergebracht, der andere Teil unter dem über den früheren Beifahrersitz verlängerten Höcker des Motorrads, unter dem auch die über Trennrelais von der Bordelektrik getrennte Spannungsversorgung der Messtechnik Platz findet. Bremsversuche mit ABS-Regelung benötigen hohe elektrische Leistungen, die die Lichtmaschine nicht nachliefern kann und die im Extremfall dazu führen können, dass die Bordspannung unter kritische Werte fällt und das ABS ausfällt¹³². Diese Erfahrung wurde auch in Vorversuchen mit einem anderen Versuchsfahrzeug gemacht, bei dem nach fortlaufenden ABS-Regelbremsungen während einer geregelten Bremsung die ABS-Funktion wegen Unterspannung ausfiel und beide Räder in die Blockade liefen. Da sich die Unterspannung auf die Messergebnisse auswirken könnte, ist diese mit einer eigenen Spannungsversorgung ausgestattet, die derart ausgelegt wurde, dass auch ohne Nachladen der Zusatzbatterie die Spannungsversorgung der Messtechnik über einen Versuchszyklus gewährleistet ist.

Das Versuchsmotorrad ist ausgestattet mit Sensoren zur Erfassung der Raddrehzahlen, der Geschwindigkeit über Grund, der Betätigungswinkel der Bedienhebel von Hand- und Fußbremse sowie Kupplung, des Lenkerdrehwinkels, der Einfederung von Vorder- und Hinterrad, der anteiligen Bremsmomente am Vorderrad, der Bremskraft am Hinterrad und der GPS-Daten Längen- und Breitengrad, Höhe über NN und Geschwindigkeit. Bild 24 zeigt die Ausstattung des Motorrads.

¹³² Thöle 2005: ABS-Ausfall, S. 8f



1	Betätigungswinkel Handbremshebel	P1	Herzschlagfrequenz
2	Betätigungswinkel Kupplungshebel	P2	Elektromyogramm Trapezmuskel rechts
3	Lenkerdrehwinkel	P3	Elektromyogramm Schließmuskel der linken Hand
4	Einfederung Vorderrad	M1	Signalkonverter, Anzeigemodul
5	Vorderraddrehzahl	M2	Messdatenaufzeichnung, CAN-Bus-Umsetzer
6	Bremsmoment vorne links und rechts	M3	Signalkonverter, Signalverstärker, CAN-Bus-Umsetzer
7	Fahrbahnbezogener Rollwinkel	M4	Spannungsversorgung für die Messtechnik, ABS-Umschaltung
8	Betätigungswinkel Fußbremshebel		
9	Einfederung Hinterrad		
10	Hinterraddrehzahl		
11	Bremskraft Hinterrad		
12	GPS: Länge, Breite, Höhe, Fahrzeuggeschwindigkeit		

Bild 24: Unterbringung der Sensorik und der messtechnischen Einrichtungen im Versuchsmotorrad

Um die Sicherheit der Testpersonen zu gewährleisten, ist das Versuchsmotorrad mit einer Umsturzvorrichtung ausgestattet, die die Freiheitsgrade des Motorrads nicht behindert, s. Bild 25. Die Vorrichtung basiert auf dem Prinzip eines doppelten Schwenkerbeiwagens rechts und links und läuft auf hochwertigen Inline-Skate Hochgeschwindigkeitsrollen mit. Trittschutzbleche verhindern ein ungewolltes Verfangen des Fußes zwischen Fahrbahn und Vorrichtung beim reflexartigen Aufsetzen des Fußes auf die Fahrbahn zur Verhinderung eines Sturzes. Bei einer sturzrelevanten Situation fängt die Vorrichtung nach einem Freigang von 30° Rollwinkel das Motorrad ab und verhindert den Sturz. Dabei wird die Inline-Skate Rolle zerstört, und die Vorrichtung stützt die auftretenden hohen Kräfte über einen massiven PTFE-Block auf der Fahrbahn ab. Alle vier während der Versuche auftretenden sturzrelevanten Situationen konnten damit sicher entschärft werden. Bei höheren Reibbeiwerten als den während der Versuche vorliegenden zusammen mit ungünstigen Rahmenbedingungen bezüglich der körperlichen Konstitution des Fahrers oder der Fahrsituation ist die Verwendung solcher ungedämpfter Umsturzvorrichtungen nicht zu empfehlen, sondern eine gedämpfte Ausführung zu verwenden mit dem Nachteil des nicht unerheblichen Einflusses auf die Querdynamik des Motorrads¹³³.



Bild 25: Umsturzvorrichtung am Versuchsmotorrad BMW R1150RT

¹³³ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 84

Das Versuchsmotorrad BMW R1150RT ist mit von der Standard-Fahrwerkskonfiguration Telegabel vorne und Schwinge hinten abweichenden Radaufhängungen ausgestattet. Die Vorderradführung mit der Bezeichnung Telelever ist eine längslenkergeführte Linearführung ähnlich einer um 90° um die Hochachse gedrehten McPherson Radaufhängung beim Pkw, die Hinterradführung mit der Bezeichnung Paralever entspricht einer Schwinge, die zwischen den Anbindungspunkten an Getriebe und Radnabe mit einem zusätzlichen Gelenk ausgestattet ist, welches eine Drehung um eine Achse parallel zur y-Achse des Fahrzeugs erlaubt, und deren so gewonnener Freiheitsgrad mit einer Zug/Druck-Strebe am Getriebe abgestützt ist. Die Höhe des Nickpols dieser Fahrwerkskonfiguration befindet sich einige Zentimeter unterhalb des Gesamtschwerpunkts von Fahrer und Motorrad im Gegensatz zum Nickpol einer Standard-Fahrwerkskonfiguration, der sich weit unterhalb der Fahrbahnoberfläche befindet¹³⁴. Folge dieses Unterschieds ist, dass auftretende Bremskräfte und –momente zum überwiegen- den Teil unmittelbar kinematisch abgestützt werden und nicht wie bei einer Stan- dard-Fahrwerkskonfiguration zu mehr als 100 % von den Feder/Dämpfer-Elementen. Für die Bremsung bedeutet dies, dass eine dynamische Vorderradüberbremsung praktisch nicht mehr möglich ist, und dass das Motorrad bei einer Bremsung nur geringfügig nickt.

3.2.2 Testpersonen

Die Testpersonen sollten verschiedenen Anforderungen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Menge der Motorradfahrer, der Erfahrung und der Verfügbarkeit für Fahrversuche erfül- len.

Die Mehrzahl der deutschen Motorradfahrer war 2000 zwischen 30 Jahre und 45 Jahre alt im Gegensatz zu 25 Jahren bis 40 Jahren 1996¹³⁵. Überproportional vertreten unter den verletzten oder getöteten Unfallopfern mit Motorradbezug waren im gleichen Zeitraum jedoch die Al- tersgruppen 18 Jahre bis 20 Jahre, 21 Jahre bis 25 Jahre und 26 Jahre bis 35 Jahre, vgl. Kapi- tel 1.3. Dabei sind im vorgenannten Zeitraum vor allem bei den Getötetenzahlen der betrachteten Altersgruppen um mehr als eine Größenordnung mehr männliche als weibliche Opfer zu beklagen (880 vs. 66), s. Bild 26.

Auch der Anteil der im Zusammenhang mit einem Motorradunfall verletzten Frauen beträgt nur einen Bruchteil der Anzahl männlicher verletzter Motorradfahrer, s. Bild 27 und Bild 28. Bezüglich der untersuchten Bremsunfälle war die deutliche Mehrzahl der in die untersuchten Unfälle involvierten Fahrer männlich und zwischen 21 Jahre und 25 Jahre sowie zwischen 31 Jahre und 40 Jahre alt¹³⁶.

¹³⁴ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremsysteme, S. 8

¹³⁵ Koch 2002: Altersstruktur der Motorradfahrer, S. 314

¹³⁶ Spörner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 168

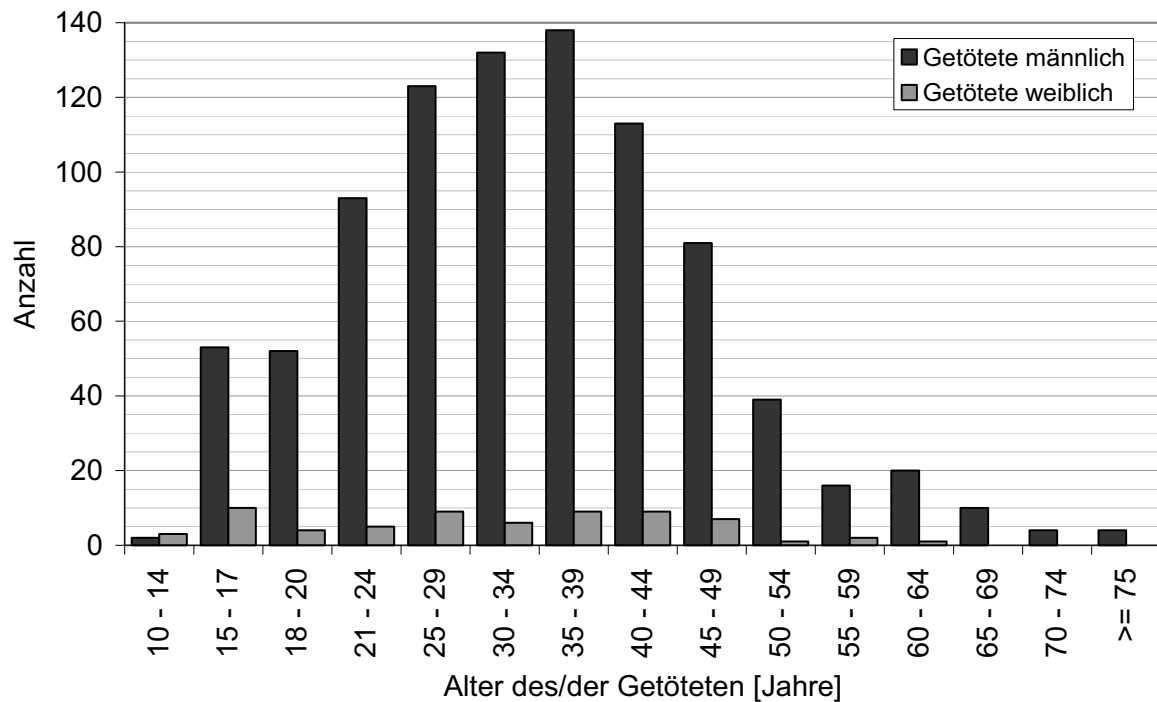


Bild 26: Bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Jahr 2003 getötete Fahrer oder Mitfahrer von Motorrädern nach Geschlecht und Alter, Gesamtzahl $n = 946$

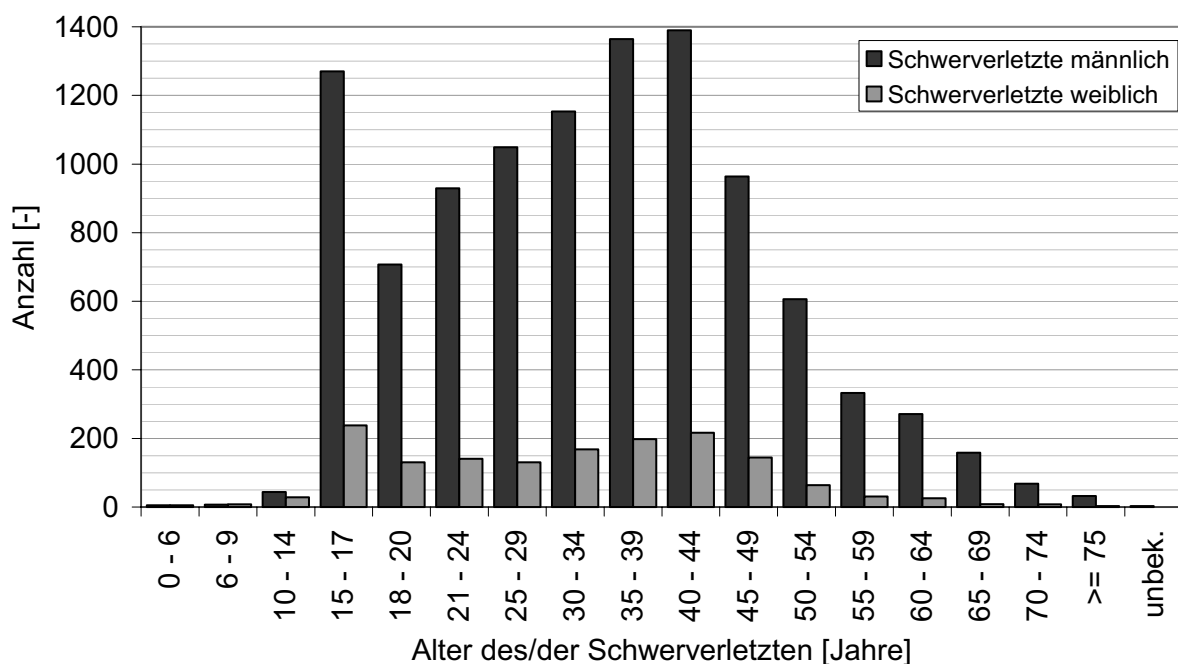


Bild 27: Bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Jahr 2003 schwer verletzte Fahrer oder Mitfahrer von Motorrädern nach Geschlecht und Alter, Gesamtzahl $n = 11.906$

Europaweit ist das Bild ähnlich. Ein Grund dafür ist, dass Deutschland als in Europa mit großem Abstand führende Motorradfahrernation schon einen großen Teil der Statistik ausmacht.

Fahrer von 18 Jahren bis zu 25 Jahren sind bezüglich ihrer Verwicklung in Motorradunfälle überrepräsentiert gemessen am Anteil der Motorradfahrer¹³⁷.

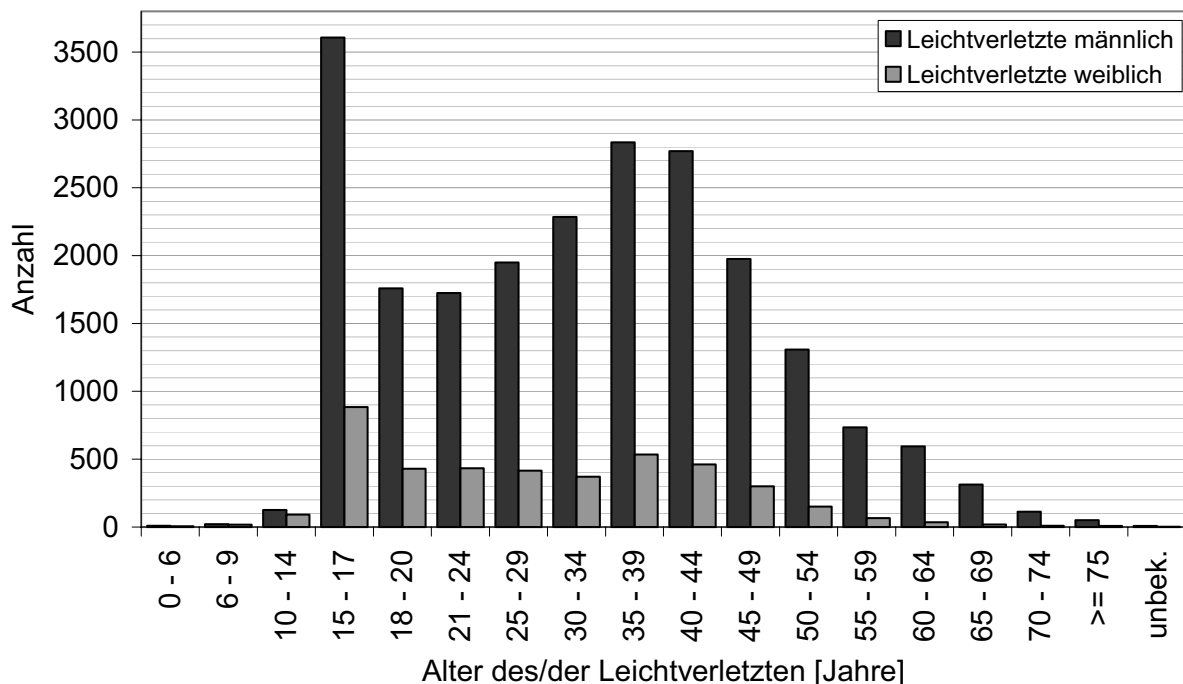


Bild 28: Bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Jahr 2003 leicht verletzte Fahrer oder Mitfahrer von Motorrädern nach Geschlecht und Alter, Gesamtzahl $n = 26.402$

Bei bisherigen Untersuchungen zeigte sich, dass Vorteile, die sich aus einer blockiergesicherten Kraftradbremse ergeben können, vor allem bei unerfahrenen Fahrern zum Tragen kommen. Ab einer Gesamtfahrerfahrung von ca. 10.000 km bis 20.000 km mit dem Motorrad sind die Testpersonen von Weidele dazu in der Lage, bei einer Geradeausbremsung auf abgesperrter Teststrecke ohne ABS sogar höhere Bremsleistungen zu erbringen als mit ABS¹³⁸. Zur Gesamtfahrerfahrung kommt die jährliche durchschnittliche Fahrleistung von Motorradfahrern hinzu, die nach einer Fernstudie über einige Jahre betrachtet bei etwa 3.600 km¹³⁹ liegt.

Die Erfahrung mit ABS ist über die Motorradfahrerpopulation ungleich verteilt und in der Gesamtbetrachtung zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung sehr gering. Während BMW 2002 in Deutschland etwa 98 % und europaweit etwa 85 % aller verkauften Motorräder mit ABS ausliefert, bieten andere Hersteller ABS als Zubehör teilweise ausschließlich in Deutschland, dem stärksten Motorradmarkt Europas, an, oder, sofern ABS überhaupt angeboten wird, verkaufen mit Ausnahme von Honda im Verhältnis zum gesamten Verkaufsvolu-

¹³⁷ Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In Depth Accident Study, S. 47

¹³⁸ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 117

¹³⁹ Spörner 2005: Laufleistungen von Motorrädern

men nur vernachlässigbar geringe Mengen an ABS-Fahrzeugen. ABS-Motorräder sind zum überwiegenden Teil Neu- oder hochpreisige Jungmotorräder, die die zu untersuchende Altersgruppe bislang meist vor eine finanziell zu große Herausforderung stellte. Inzwischen sind auch preiswertere Massenmotorräder ab 600 cm³ Hubraum mit ABS im Portfolio der Hersteller.

Die auszuwählenden Testpersonen sollten also Teil der Risikogruppe der jungen Männer zwischen 20 Jahren und 35 Jahren sein und angesichts der anspruchsvollen Aufgabenstellung sehr erfahrene Motorradfahrer. Die neun ausgewählten Testpersonen sind zwischen 22 Jahre und 31 Jahre alt, haben eine Gesamtfahrerfahrung zwischen 18.000 km und ca. 200.000 km und legen jährlich zwischen 3.000 km und 25.000 km mit dem Motorrad zurück. Damit passen sie in das vorgezeichnete Anforderungsprofil für im Straßenverkehr gefährdete Testpersonen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Unterschiede in der psychischen und physischen Beanspruchung während der Erfüllung der gestellten Bremsaufgaben bei Motorradfahrern aus anderen Gruppen (weniger erfahren, älter) stärker hervortreten als bei den untersuchten Testpersonen. Die mit Abstand erfahrenste Testperson hat mit einem Anteil von 70.000 km an den 200.000 km Gesamtfahrerfahrung große Erfahrung mit ABS und auch Erfahrung mit Kombinationsbremssystemen, alle anderen Testpersonen haben dahingehend keine Erfahrung. Alle Testpersonen sind technisch versiert und kennen theoretisch die Funktionsweisen von ABS und Kombinationsbremssystemen sowie die Besonderheiten des Fahrwerks des Versuchsmotorrads, s. Kapitel 3.2.1. Eine Statistik über die die Testpersonen kennzeichnenden Größen Alter und Gesamtfahrerfahrung zeigt Bild 29.

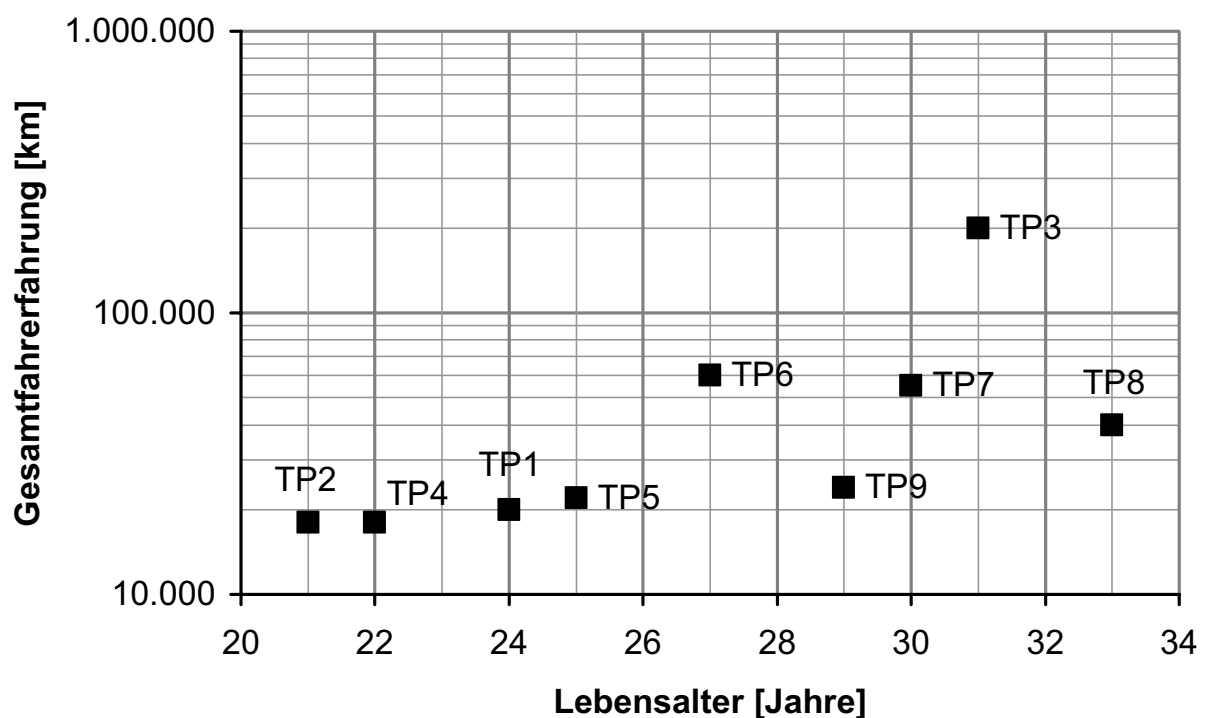


Bild 29: Motorrad-Gesamtfahrerfahrung und Lebensalter der Testpersonen

3.2.3 Physiologische Messtechnik

Mithilfe der physiologischen Messtechnik sollen Messdaten erfasst werden, die eine Aussage über die physische und psychische Beanspruchung der Testperson erlauben. Eine zur Darstellung von Beanspruchung geeignete Messgröße ist die Herzschlagfrequenz, die sowohl mit der psychischen als auch mit der physischen Beanspruchung steigt¹⁴⁰. Die Herzschlagfrequenz kann aufgrund der Schutzbekleidung des Motorradfahrers nicht komfortabel am Ohrläppchen oder am Zeigefinger der Testperson abgenommen werden, sondern wird konventionell über Elektroden an Brust und Rücken erfasst, s. Bild 30.

In Vorversuchen erwies sich die Erfassung des Hautleitwiderstands wegen des klimatischen Einflusses als ungeeignet. Beim Motorrad Fahren schwankt das Klima für den Fahrer stark. Bei einer mit zügigem Tempo gefahrenen Bergetappe kann die Temperatur an der Hautoberfläche so weit sinken, dass der Motorradfahrer friert; kurze Zeit darauf im Tal an der Ampel, der Abwärme seines Motorrads ausgesetzt, schwitzt der Motorradfahrer stark. Bei den vorliegenden Bremsversuchen ist eine Änderung des Klimas innerhalb der Motorradkleidung dahingehend zu erwarten, dass mit dem zeitlichen Fortschritt der Versuche die Abwärme des Motorrads den Fahrer in seiner Schutzkleidung aufheizen könnte.

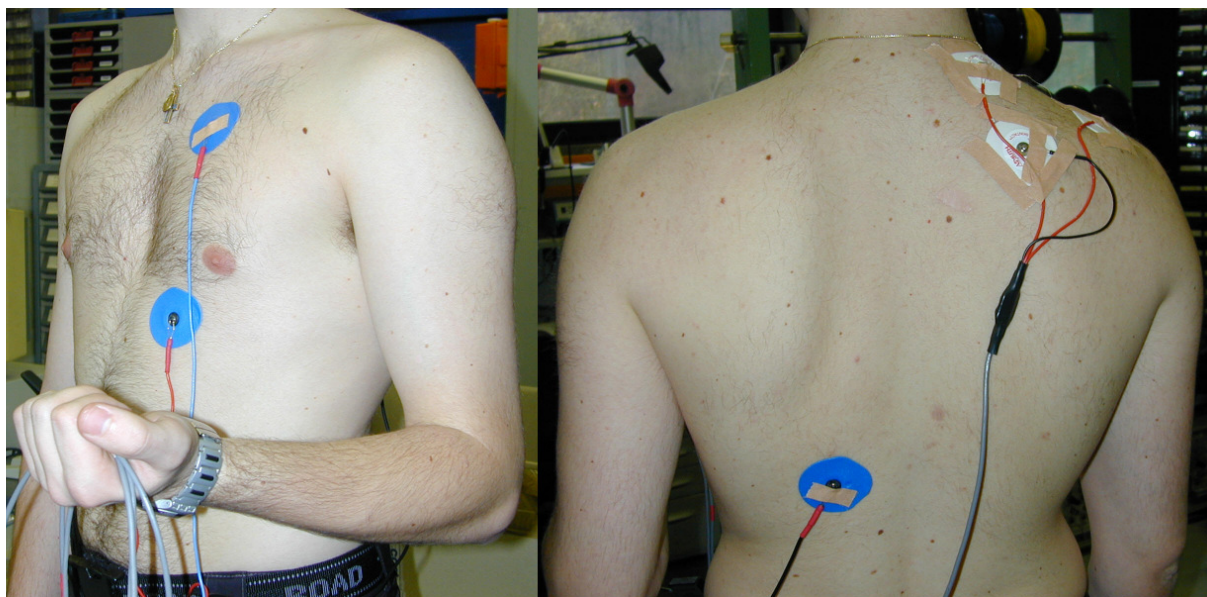


Bild 30: Testperson, ausgestattet mit einem Teil der elektromyographischen und elektrokardiographischen Versuchsausrüstung

Die Aufnahme eines Elektromyogramms (EMG) gibt Aufschluss über den Aktivierungszustand des abgetasteten Muskels oder der Muskelgruppe. Über geeignete Messpunkte zur Aufnahme eines EMG zur Messung der physischen Beanspruchung bei Motorradfahrern gibt es keine Veröffentlichung. Es wurden in Vorversuchen Messpunkte ausgewählt, die auf eine

¹⁴⁰ Zipp 1988: Oberflächenableitung bioelektrischer Signale

Anspannung des Motorradfahrers wegen seiner psychischen Beanspruchung rückschließen lassen. In der Literatur wird berichtet von einem übermäßigen Schließen der Kaumuskulatur, vom verkrampften Festhalten am Lenker des Motorrads, dem Hochziehen der Schultern und einem übermäßig starken Knieschluss am Tank zusammen mit angespannter Gesäßmuskulatur¹⁴¹. In Vorversuchen wurden daraufhin Elektromyogramme des Hauptschließmuskels der linken Hand (*musculus flexor digitorum superficialis*), des rechten Trapezmuskels (*musculus trapezius pars descendens*) und der Adduktoren (links) aufgenommen. Im Rahmen dieser Vorversuche wurde die Aufnahme der elektrischen Aktivität der Adduktoren wegen zu geringer Aussagekraft nicht weiter verfolgt. Eine mögliche Ursache könnte die Vielfältigkeit der Aufgaben sein, die die Adduktoren beim Motorrad Fahren erfüllen. Während der Fahrt hebt und senkt der Fahrer unbewusst ständig seine Beine, worin auch die Adduktoren einbezogen sind. Eine Aussage über besonders beanspruchende Fahrsituationen konnte daher aus der elektrischen Aktivität der Adduktoren nicht abgeleitet werden.

Die Elektromyogramme des Hauptschließmuskels der linken Hand und des Trapezmuskels erwiesen sich als zur Darstellung der Belastung der Testpersonen geeignet mit nur geringen Störeinflüssen aus Handlungen ohne Belastungsbezug; der Hauptschließmuskel der linken Hand ist zu einem zeitlich vernachlässigbaren Anteil, vgl. Kapitel 4.1.1, für die Kupplungsbetätigung zuständig, der Trapezmuskel wird in zeitlich und größenordnungsmäßig geringem Maß auch bei der Einleitung einer Kurve aktiviert. Die Elektromyogramme des Hauptschließmuskels der linken Hand und des Trapezmuskels sollen daher bei den vorliegenden Bremsversuchen Verwendung finden.

3.2.4 Psychologische Werkzeuge

Die psychische Disposition eines Fahrers kann einen Einfluss haben auf das Versuchsergebnis. Umgekehrt kann der Versuch sich auf den psychischen Zustand, beispielsweise die Befindlichkeit oder die Konzentrationsfähigkeit des Fahrers, auswirken. Weiterhin dürfen jedoch psychologische Tests an Probanden nicht den Versuchsablauf derart stören, dass sie das Versuchsergebnis beeinflussen. Bei der Untersuchung von fünf Bremssystemen entstehen vier Pausen. Zusammen mit einem Test vor den Versuchen und einem Test danach sind für eine Aussage über die Bremssysteme also sechs gleiche Tests notwendig. Da die Bremsversuche selbst ohne Pause bereits 90 min. benötigen, sollten die psychologischen Tests selbst nur wenig Zeit benötigen. Eine zu große Gesamtversuchsdauer bedeutet die Gefahr nicht konstanter Wetterbedingungen, der Ermüdung der Testperson etc. Übliche validierte Methoden zur Ermittlung der Konzentrationsfähigkeit wie Nebenbeschäftigung, d2-Test oder die Ermittlung der Flimmerverschmelzungsschwelle schieden aus verschiedenen Überlegungen aus: Die Ausübung einer Nebenbeschäftigung bei Bremsversuchen ist im Rahmen des vorliegenden Versuchsaufbaus von der Testperson nicht gefahrlos leistbar, so dass ein entsprechender Test

¹⁴¹ Spiegel 1998: Die obere Hälfte des Motorrads

keine Unterschiede zwischen Bremssystemen wird herausstellen können. Ein d2-Test oft wiederkehrend in kurzen zeitlichen Abständen ist aufgrund des Lerneffekts schwierig auswertbar, und das Ergebnis wird unscharf¹⁴². Zur Durchführung eines Tests zur Ermittlung der Flimmerverschmelzungsschwelle ist eine gewisse Infrastruktur notwendig, die auf dem Versuchsgelände nicht ohne weiteres darstellbar ist. Daher wurde auf einen Konzentrationstest auch zwischen den Versuchen verzichtet.

Die Befindlichkeit der Testpersonen wurde vor, zwischen und nach den Versuchen mit einem bei Fahrertrainings eingesetzten Befindlichkeits-Kurztest¹⁴³, einer Form der Eigenzustandsbeschreibung, ermittelt.

¹⁴² Brickenkamp 1975: d2-Test

¹⁴³ Kerwien et al. 2000: Subjektive Sicherheit bei Rennstreckentrainings, S. 129-144

4 Versuchsergebnisse

4.1 Intraindividuelle Betrachtung

Die intraindividuelle Betrachtung bezieht sich zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen vorrangig auf die Verschiedenartigkeit der Bremssysteme und die Fahraufgaben Kurvenbremsung und Geradeausbremsungen mit verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten. Bei den Bremssystemen ist demnach eine Gegenüberstellung der Bremssysteme mit und ohne ABS gefordert, ebenso eine Gegenüberstellung von Standard- und Kombibremse jeweils ohne ABS und die Gegenüberstellung von Einhebel- und Zweihebelbedienung beim blockiergesicherten Kombinationsbremssystem.

Zunächst wird die vorab aufgestellte Hypothese überprüft, wonach aufgrund der gleichen physikalischen Randbedingungen die Bremsleistungen mit verschiedenen Bremssystemen ebenfalls gleich groß sind.

4.1.1 Vorhandensein eines Blockierverhinderers

Zunächst werden die Bremsleistungen der Gesamtheit der Testpersonen bei Bremsungen mit und ohne ABS getrennt nach der Fahraufgabe überprüft. Die mutmaßlich einfachste der drei Fahraufgaben ist die Geradeausbremsung aus 60 km/h. Mit einer im Vergleich zu den auf öffentlichen Straßen von Verkehrsteilnehmern realisierten Geschwindigkeiten¹⁴⁴ geringen kinetischen Energie in Kombination mit der im Allgemeinen großen Erfahrung von Verkehrsteilnehmern mit dieser Geschwindigkeitsklasse¹⁴⁵ und damit einhergehend auch der innerhalb der gefahrenen Versuche größten Bereitschaft von Versuchspersonen, sich mit hohen Beschleunigungen zu befassen¹⁴⁶ ist bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h eine geringere psychische Beanspruchung der Testpersonen zu erwarten als bei den beiden anderen Fahraufgaben. Bild 32 zeigt die Gesamtverzögerungen und die in Kapitel 2.7 hergeleiteten Teilverzögerungen für Bremsungen mit und ohne ABS aus 60 km/h.

¹⁴⁴ Schröder 2000: Betriebsweise, Emissionen und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern

¹⁴⁵ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 96

¹⁴⁶ Bielaczek 1998: Aktive Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit

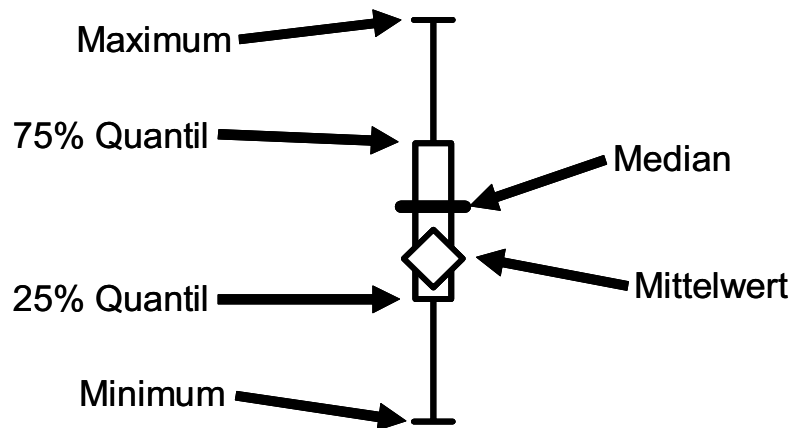


Bild 31: Boxplot-Darstellung wichtiger statistischer Kenngrößen

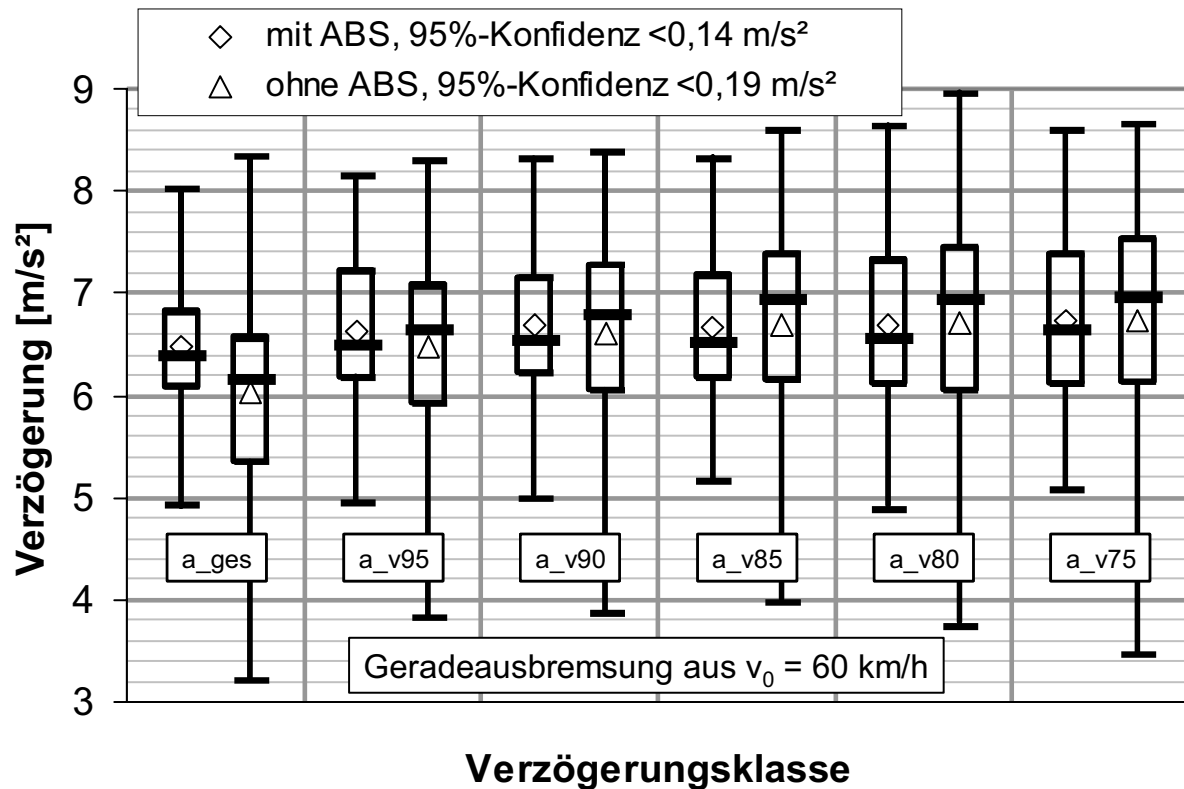


Bild 32: Geradeausbremsung aus 60 km/h; Gesamtverzögerung und zeitbezogene geschwindigkeitsindizierte Teilverzögerungen

Tendenziell liegt die Gesamtverzögerung mit Bremssystemen ohne ABS unterhalb der Gesamtverzögerung mit ABS, wohingegen im späteren Verlauf der Bremsung ohne ABS höhere Verzögerungen realisiert werden. Das bedeutet, dass die Testpersonen zu Beginn der Bremsung ohne ABS signifikant geringere Verzögerungen erreichen. Bei der Betrachtung der Mediane und der Mittelwerte der geschwindigkeitsindizierten Verzögerungsklassen wird deutlich, dass bei den Bremssystemen mit ABS die Trennung zwischen Einleitungsphase der Bremsung und Vollbremsphase bei höheren Ausgangsgeschwindigkeiten festgelegt werden

kann als der entsprechende Wert bei Bremssystemen ohne ABS. Unabhängig davon, dass der Gesamtbremsweg mit ABS tendenziell kürzer ist als ohne ABS, ist durch den schnelleren Geschwindigkeitsabbau bei der Bremsung mit ABS eine auf die während der Bremsung bereits zurückgelegte Strecke x bezogene Differenz der Restgeschwindigkeiten v_x mit und ohne ABS am Wegpunkt $s = x$ umso größer, je kleiner x ist. Ist diese Strecke $x < s_{\text{ges}}$, beispielsweise bei einem gebremsten Aufprall auf ein Hindernis, so ist die kinetische Energie, in die die Geschwindigkeit quadratisch einfließt, beim Aufprall signifikant geringer, wenn die Bremsung mit ABS durchgeführt wurde. Weiterhin kann in Bild 32 beobachtet werden, dass die Spreizung in den einzelnen Verzögerungsklassen ohne ABS deutlich größer ist als bei Bremsungen mit ABS. Dies stimmt vor allem bei den minimalen Verzögerungen nachdenklich, liegt doch das Minimum der Gesamtverzögerung ohne ABS mit einem Abstand von weniger als 1 m/s^2 über dem durch das Motorschleppmoment des Versuchsmotorrads erreichbaren Wert. Gründe dafür können sein, dass der Anstieg der Bremskraft sehr zögerlich ausgeführt wurde oder dass eine Radblockade korrigiert wurde durch Öffnen der Bremse und neuerliches Ansetzen der Bremsung. Für den konkreten Minimalwert ist eine Kombination aus beidem ursächlich.

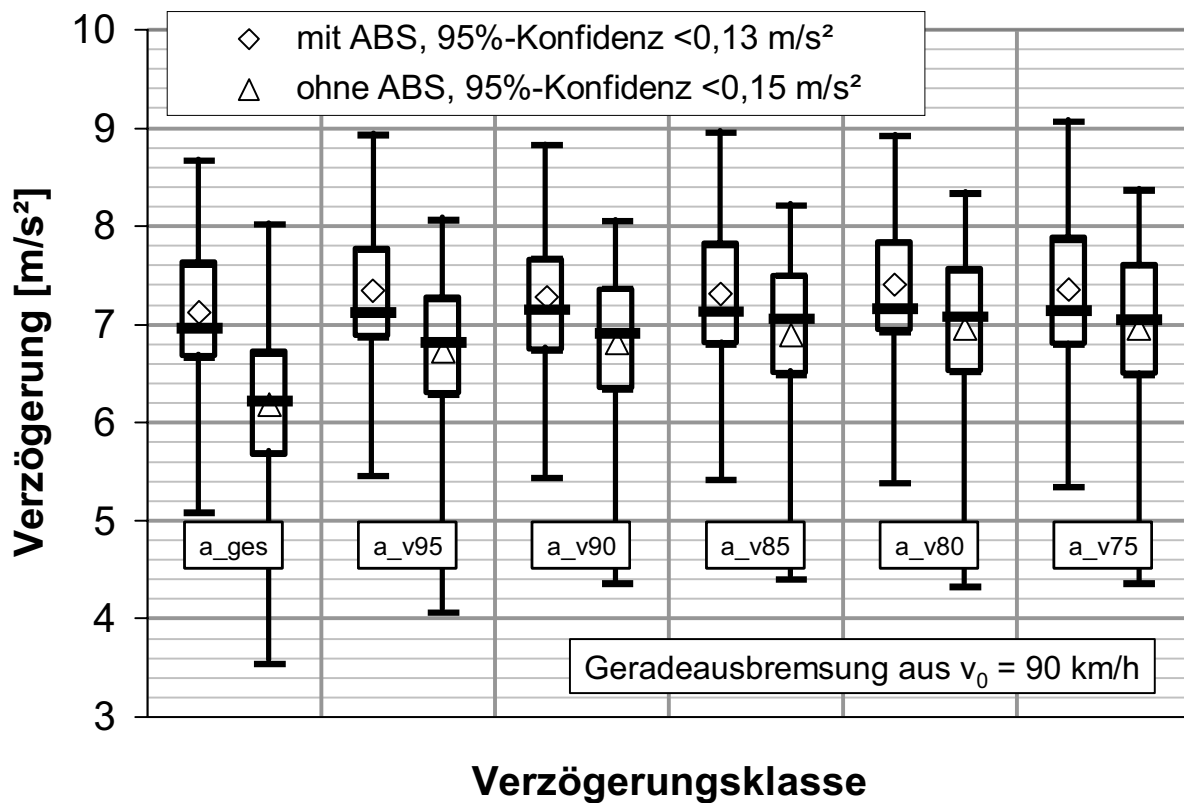


Bild 33: Geradeausbremsung aus 90 km/h ; Gesamtverzögerung und zeitbezogene geschwindigkeitsindizierte Teilverzögerungen

Bei Bremsungen aus 90 km/h ist ebenfalls gegeben, dass die Testpersonen mit dieser Geschwindigkeit eine große Erfahrung besitzen. Die kinetische Energie ist bei 90 km/h mehr als doppelt so groß wie bei der vorab betrachteten Bremsung aus 60 km/h . Auch wenn die menschliche Sensorik Energien und Geschwindigkeiten im Gegensatz zu Beschleunigungen

nicht unmittelbar erfassen kann, nimmt mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit die Bereitschaft zur Realisierung hoher Verzögerungen ab¹⁴⁷, nicht jedoch die Fähigkeit dazu: bei höheren Geschwindigkeiten bleibt dem Fahrer mehr Zeit zum Einregeln der maximal möglichen Abbremsung. Zur weiteren Erhöhung der Verzögerung trägt die bei höherer Geschwindigkeit überproportional höhere Luftwiderstandskraft bei. Bild 33 zeigt die Gesamt- und Teilverzögerungen der Testpersonen bei Geradeausbremsungen aus 90 km/h mit und ohne ABS.

Bei den Geradeausbremsungen aus 90 km/h zeigt sich das gleiche Bild wie bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h. Sowohl qualitativ wie auch quantitativ liegen die Mediane und Mittelwerte der Gesamtverzögerung und der geschwindigkeitsindizierten Teilverzögerungen aus 90 km/h und aus 60 km/h innerhalb des 95 % Konfidenzintervalls auf gleichem Niveau.

Bei dieser gegenüber der Geradeausbremsung aus 60 km/h nur geringfügig höheren Ausgangsgeschwindigkeit zeigt sich, dass die Testpersonen mit ABS signifikant höhere Gesamtverzögerungen als ohne ABS erzielt haben. Die bei der Diskussion der Ergebnisse aus den Versuchen mit 60 km/h gemachten Aussagen gelten bei der Bremsung aus 90 km/h in verstärktem Maße, wie ein einfaches Rechenbeispiel mit den Medianwerten zeigt: Aus der Geschwindigkeit von 84 km/h (vgl. Bild 15) mit einer Verzögerung von $6,97 \text{ m/s}^2$ bei Bremsungen mit ABS beträgt der resultierende Bremsweg 39,06 m, mit einer Verzögerung von $6,22 \text{ m/s}^2$ bei Bremsungen ohne ABS ebenfalls aus 84 km/h beträgt der resultierende Bremsweg dementsprechend 43,77 m. Die Differenz beträgt demnach 4,71 m, was konservativ mit der Verzögerung $a_{v75} = 7,05 \text{ m/s}^2$ gerechnet bedeutet, dass an dem Punkt, an dem die durchschnittliche Testperson mit ABS steht, diese durchschnittliche Testperson ohne ABS noch mit einer Geschwindigkeit von 29,3 km/h diese Stelle passiert.

Die Betrachtung der Bremsleistungen mit und ohne Blockierverhinderer bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h zeigt wiederum die signifikant höheren Gesamtverzögerungen, die bei Bremsungen mit ABS verglichen mit Bremsungen ohne ABS erreicht werden, s. Bild 34.

Im Unterschied zu den vorab betrachteten Geradeausbremsungen liegen jedoch auch die geschwindigkeitsindizierten Teilverzögerungen ohne ABS im Mittel signifikant unter denen mit ABS. Des Weiteren ist die Trennung zwischen Einleitungs- und Vollbremsphase mit ABS bei ungefähr 85 % der Ausgangsgeschwindigkeit anzunehmen, wohingegen das Ende der Einleitungsphase der Bremsung ohne ABS in der Darstellung nicht auszumachen ist. Die erreichten Mindestverzögerungen ohne ABS könnten in dieser Höhe ohne weiteres auch ganz ohne Einsatz der Bremse realisiert werden.

Ausgehend von der Hypothese 3, der zugrunde liegt, dass sich die physikalischen Grenzen von Bremssystemen mit und ohne ABS nicht unterscheiden, resultiert diese Bremsleistungsdifferenz allein aus der erhöhten psychischen Beanspruchung der Testpersonen bei Bremsungen mit Bremssystemen ohne ABS. Der erhöhten psychischen Beanspruchung liegt eine er-

¹⁴⁷ Präckel 1996: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS

höhte psychische Belastung zu Grunde, nämlich das Wissen um den nicht vorhandenen Blockierverhinderer der Bremse. Wenn sich dies auch über die Bremsung hinaus bemerkbar macht, so wäre der Fahrer eines motorisierten Zweirads ohne ABS bereits einer erhöhten psychischen Grundbelastung ausgesetzt gegenüber dem Fahrer eines motorisierten Zweirads mit ABS. Unter der vereinfachenden Annahme, dass ein Fahrer nur eine gewisse psychische Belastung ertragen kann, hat ein Fahrer eines mit ABS ausgestatteten Motorrads größere Belastungsreserven für kritische und somit psychisch außerordentlich belastende Situationen als ein Fahrer eines identischen Fahrzeugs ohne ABS.

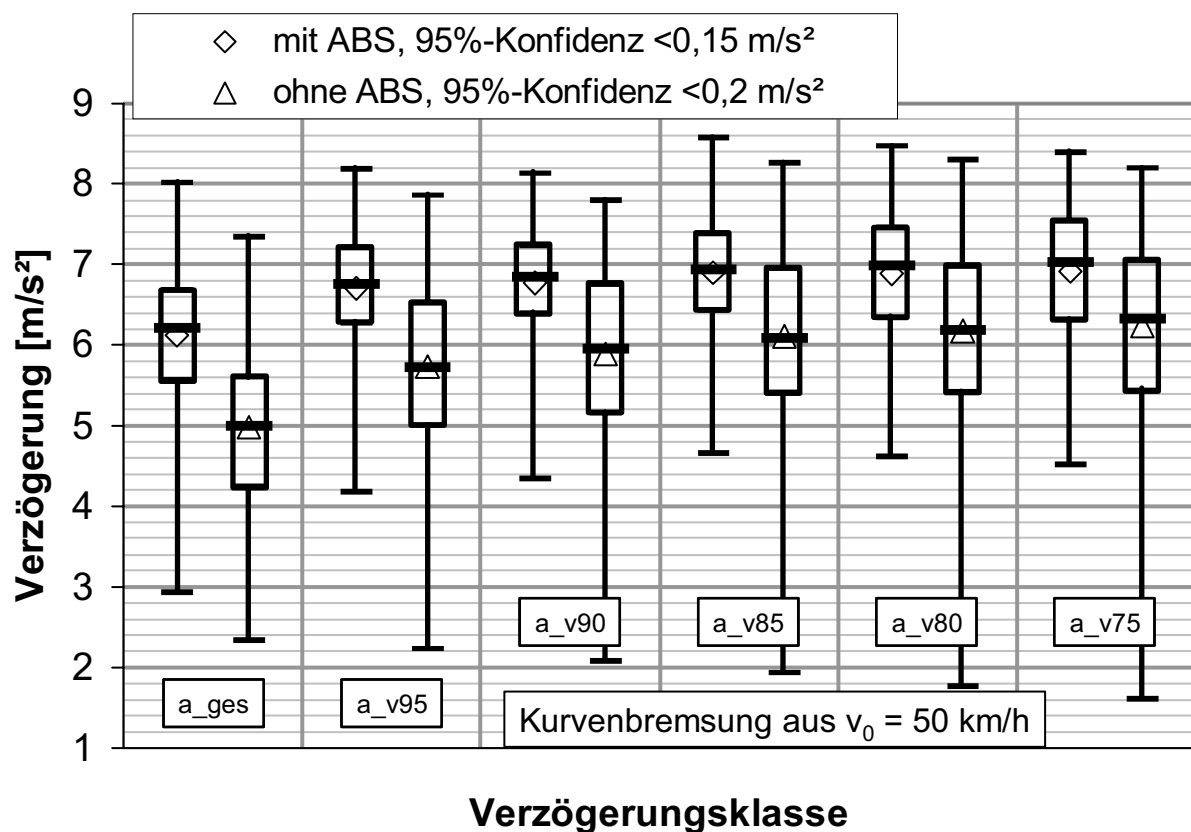


Bild 34: Kurvenbremsung aus 50 km/h, Kurvenradius 50 m; Gesamtverzögerung und zeitbezogene geschwindigkeitsindizierte Teilverzögerungen

Dabei ist zunächst nicht geklärt, ob bei den vorliegenden Fahrversuchen das vorhandene ABS auch eingesetzt wurde. Bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h wurde von allen Bremssituationen mit blockiergesicherten Bremsen nur in 2,2 % der Bremsungen das ABS nicht eingesetzt, die dabei erzielten Verzögerungen liegen innerhalb der mit ABS-Einsatz erzielten Verzögerungen.

Bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h wurde bei 4,5 % der Bremssituationen das ABS nicht eingesetzt. Darunter ist eine Bremsung, deren Bremsleistung unter denen der Bremsungen mit ABS-Einsatz liegt, s. Bild 35, wenn auch innerhalb der vom Konfidenzintervall vorgegebenen Grenzen. Auch die anderen Bremsungen ohne ABS-Einsatz liegen im Bereich

des Konfidenzintervalls und weichen nicht signifikant von den Bremsungen mit ABS-Einsatz ab.

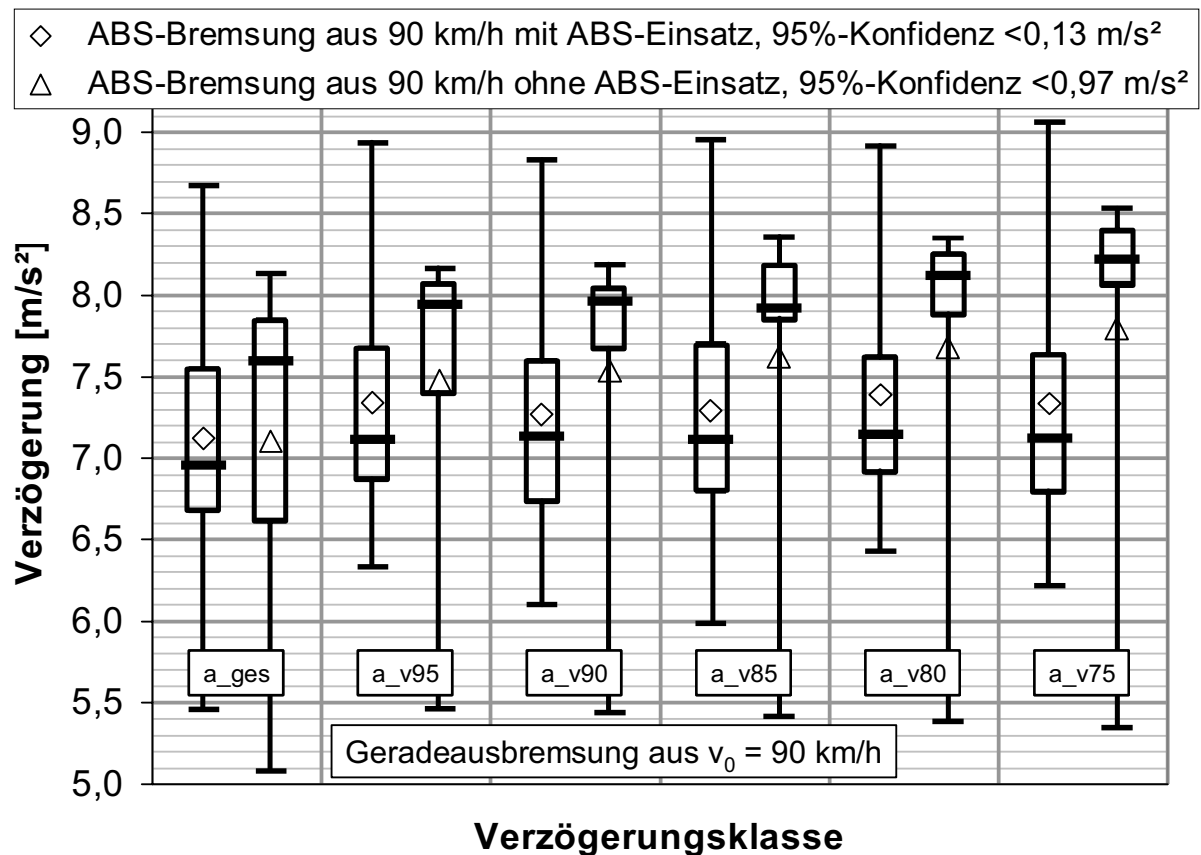


Bild 35: Zeitbezogene Verzögerungen mit und ohne Einsatz des ABS in Bremssituationen mit blockiergesicherten Bremssystemen; Geradeausbremsung aus 90 km/h

Bei der Bremsaufgabe Kurvenbremsung liegt der Anteil der Bremssituationen ohne ABS-Einsatz an den Bremsungen mit blockiergesicherten Bremssystemen mit 40,6 % um Größenordnungen über den entsprechenden Anteilen bei den Geradeausbremsungen. Die Mediane der Gesamtverzögerungen der Bremsungen ohne ABS-Einsatz liegen signifikant unter denen der Bremsungen mit ABS-Einsatz, was nach Betrachtung der geschwindigkeitsindizierten Verzögerungswerte primär dem zögerlichen Aufbau der Verzögerung zuzuschreiben ist, s. Bild 36.

Die psychische Beanspruchung bei Bremsungen mit und ohne blockiergesicherte Bremssysteme kann außer aus den dargelegten Unterschieden in den Bremsleistungen auch aus der messbaren Mischung aus physischer und psychischer Beanspruchung hergeleitet werden. Erfüllte Voraussetzung ist dafür, dass interindividuell die physische Belastung konstant gehalten wird. Nachfolgend werden die ermittelten physischen Beanspruchungsgrößen diskutiert.

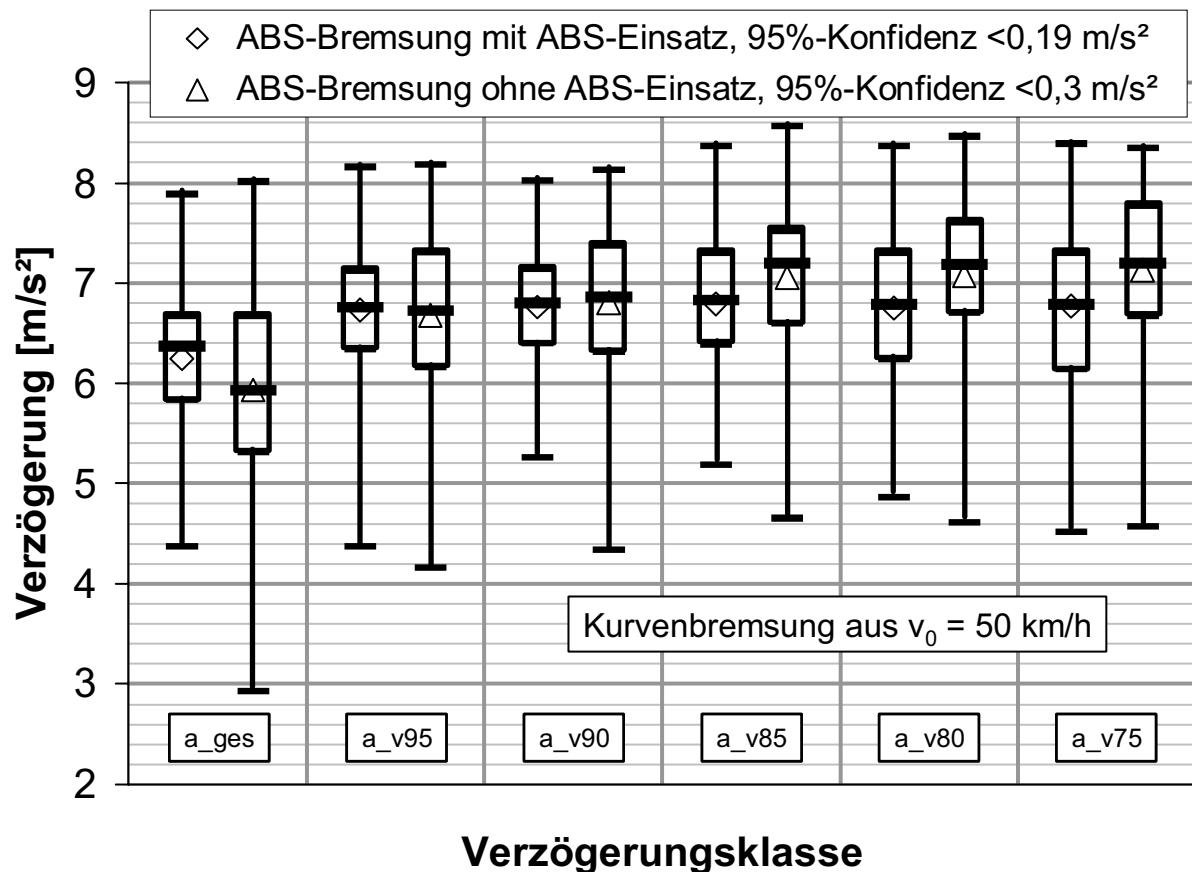


Bild 36: Zeitbezogene Verzögerungen mit und ohne Einsatz des ABS in Bremssituationen mit blockiergesicherten Bremssystemen; Kurvenbremsung mit Kurvenradius 50 m aus 50 km/h

Bild 37 zeigt für die einzelnen Testpersonen die muskuläre Beanspruchung des Trapezmuskels und des Hauptschließmuskels der Hand wie gebräuchlich als Mediane der elektrischen Aktivität und die Mediane der Arbeitsherzschlagfrequenz. Diese Werte werden nicht während der Bremssituation ermittelt, sondern als zeitlicher Längsschnitt durch die Versuchsfahrt der Testperson mit dem betreffenden Bremssystem und somit über alle Bremsaufgaben hinweg.

Die Beanspruchung des musculus trapezius pars descendens beim Motorradfahren richtet sich in erster Linie nach der Haltung, die das Motorrad dem Motorradfahrer vorgibt. Da das Motorrad während der Versuche nicht gewechselt wird und die gefahrenen Geschwindigkeiten über die Versuche hinweg gleich groß bleiben, sind laut vorab aufgestellter Hypothese 6 etwaige Unterschiede einer geänderten psychischen Beanspruchung zuzuordnen. Bezüglich des Anteils an der Maximalkraft liegt die Beanspruchung des Trapezmuskels, gemessen an deren Median, an der Grenze zur höchstmöglichen Krafteinleitung, die ermüdungsfrei über lange Zeiten zu leisten ist¹⁴⁸.

¹⁴⁸ Rohmert 1992: Beanspruchung, Ermüdung und Erholung, S. 168

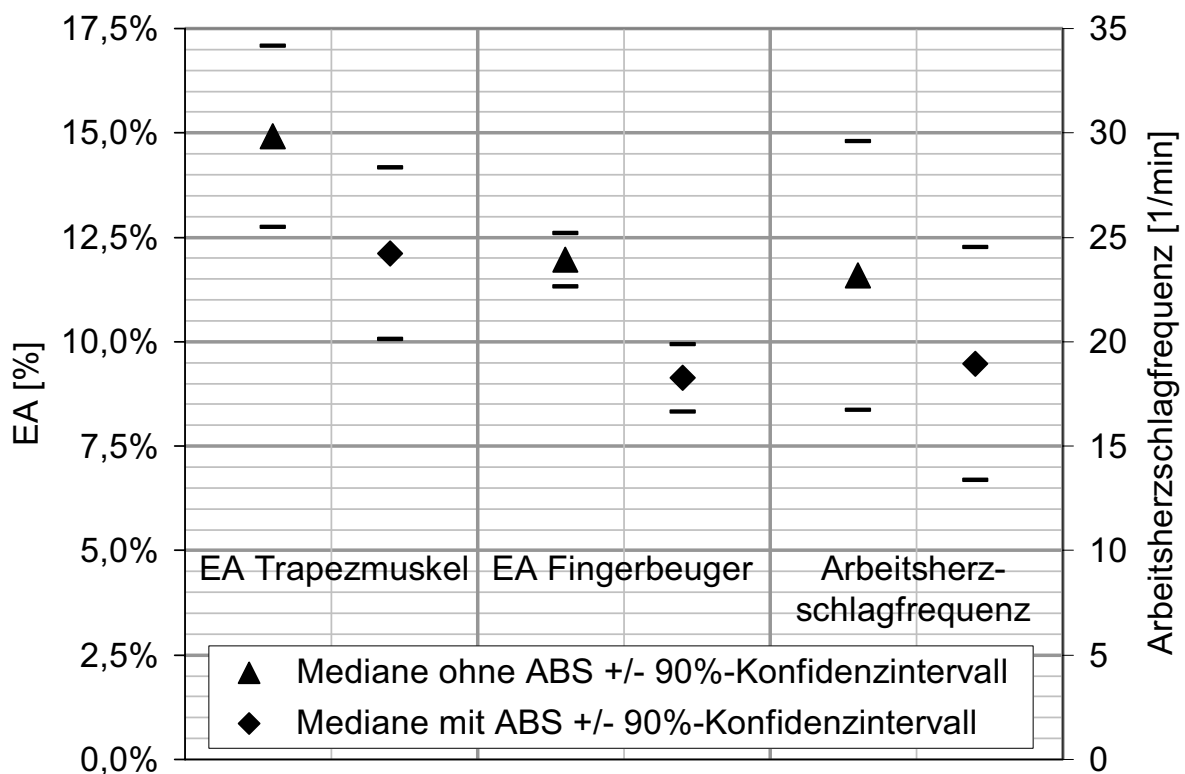


Bild 37: Elektrische Aktivität des Trapezmuskels und des Hauptschließmuskels der linken Hand sowie Arbeitsherzschlagfrequenz bei Versuchsfahrten mit Bremssystemen mit und ohne Blockierverhinderer

Dabei setzt sich die dargestellte elektrische Aktivität aus einem statischen und einem dynamischen Anteil zusammen: der statische Anteil rührt aus der vom Fahrer zu verrichtenden Haltearbeit bei der Konstantfahrt her, der dynamische Anteil aus den vom Fahrer abzustützensen Massenkraften bei der Beschleunigung und der Verzögerung des Systems Fahrer und Motorrad. Da der dynamische Anteil der elektrischen Aktivität des Trapezmuskels als direkt im dynamischen Kraftfluss liegende Muskelgruppe größer ist als beim Hauptschließmuskel der linken Hand, ist auch die Streubreite der elektrischen Aktivität beim Trapezmuskel größer.

Bei allen Testpersonen (vgl. Kapitel 3.2.2) ist die Beanspruchung des Trapezmuskels bei Bremssystemen mit ABS niedriger als bei Bremssystemen ohne ABS. Diese Unterschiede sind im Zusammenhang mit der Anzahl der Testpersonen nicht signifikant, so dass das Ergebnis als Trend anzusehen ist.

Der Hauptschließmuskel der linken Hand wird physisch vor allem durch die Kupplungsbetätigung beansprucht. Diese Belastung hat einen geringen Zeitanteil¹⁴⁹, der des Weiteren intra- und interindividuell nur innerhalb 1 % der Gesamtzeit schwankt. Durch den nur geringen Einfluss der Maxima auf den Median wird der eventuelle Einfluss der Kupplungsbetätigung auf

¹⁴⁹ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremssysteme, S. 23

den Median der Elektrischen Aktivität des Hauptschließmuskels der linken Hand weiter vermindert. Daher kann ohne weitere Einschränkung die Auswertung der elektrischen Aktivität des *musculus flexor digitorum superficialis* wie vorab im Zusammenhang mit dem Trapezmuskel beschrieben vorgenommen werden.

Bei allen Testpersonen ist der Median der elektrischen Aktivität des Hauptschließmuskels der linken Hand bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit ABS geringer als mit Bremssystemen ohne ABS. Dieser Unterschied ist in der Summe der Testpersonen signifikant. Die erhöhte elektrische Aktivität bei der Versuchsdurchführung mit nicht blockiergesicherten Bremssystemen weist darauf hin, dass die Hand der Testperson im Mittel über die Versuchszeit den Lenkergriff des Versuchsmotorrads mit einer höheren Kraft umschlossen hat¹⁵⁰. Die Konfidenzintervalle um die höheren Schließkräfte bei der Versuchsdurchführung ohne ABS sind tendenziell kleiner als die um die Konfidenzintervalle der elektrischen Aktivität des Hauptschließmuskels der Hand bei der Versuchsdurchführung mit blockiergesicherten Bremssystemen. Zu erhöhten Handschließkräften besteht aus technischer Sicht keine Notwendigkeit, so dass in logischer Folge davon ausgegangen wird, dass die erhöhte elektrische Aktivität des Hauptschließmuskels der linken Hand bei Versuchsdurchführungen mit Bremssystemen ohne Blockierverhinderer aus einer erhöhten psychischen Beanspruchung resultiert.

Die Arbeitsherzschlagfrequenz als Differenz zwischen der aktuellen Herzschlagfrequenz und einer während einer Ruhephase ermittelten Grundherzschlagfrequenz spricht nicht bei allen Testpersonen als Indikator für physische oder psychische Beanspruchung an. Wie schon an anderer Stelle beschrieben¹⁵¹ sind auch im vorliegenden Fall unter den Testpersonen Personen, die auf eine psychische Beanspruchung mit einer signifikanten Änderung der Arbeitsherzschlagfrequenz reagieren; andere Testpersonen zeigen keine signifikanten Differenzen in der Arbeitsherzschlagfrequenz während der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit und ohne Blockierverhinderer.

Unter der Berücksichtigung der mit Bremssystemen mit Blockierverhinderer höheren aufgebrachten Gesamtverzögerungen und der damit einhergehenden höheren physischen Belastung kann der daraus zu erwartende Differenzbetrag der Herzschlagfrequenz aus den vorliegenden Versuchsergebnissen zwar nicht quantifiziert werden, jedoch ist in der Projektion der Bremsleistungsergebnisse auf den vorab dazu entwickelten Zusammenhang zwischen physischer Beanspruchung und der Bremsverzögerung tendenziell eine höhere Herzschlagfrequenz bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit Blockierverhinderer zu erwarten. Aufgrund der fehlenden Quantifizierung kann an dieser Stelle für das Mittel der Versuchspersonen nur von einem Trend gesprochen werden, dass die Arbeitsherzschlagfrequenz bei der

¹⁵⁰ Kluth et al. 1996: Beanspruchung des Hand Arm Schulter Systems, S. 95

¹⁵¹ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremssysteme, S. 23

Versuchsdurchführung mit nicht blockiergesicherten Bremssystemen gegenüber der mit blockiergesicherten Bremssystemen ansteigt.

Zusammenfassend kann aus den Beanspruchungsgrößen abgeleitet werden, dass die Hypothese, wonach die intraindividuelle Beanspruchung bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit und ohne ABS gleich hoch ist, abzulehnen ist. Aus der Voraussetzung, dass die physische Belastung für die Testpersonen konstant gehalten wurde, ist rückschließend anhand der Beanspruchungsgrößen festzustellen, dass durch das Fehlen eines Blockierverhinderers die psychische Belastung der Testpersonen größer ist als bei der Versuchsdurchführung mit blockiergesicherten Bremssystemen.

4.1.2 Standard- und Kombinationsbremsanlage

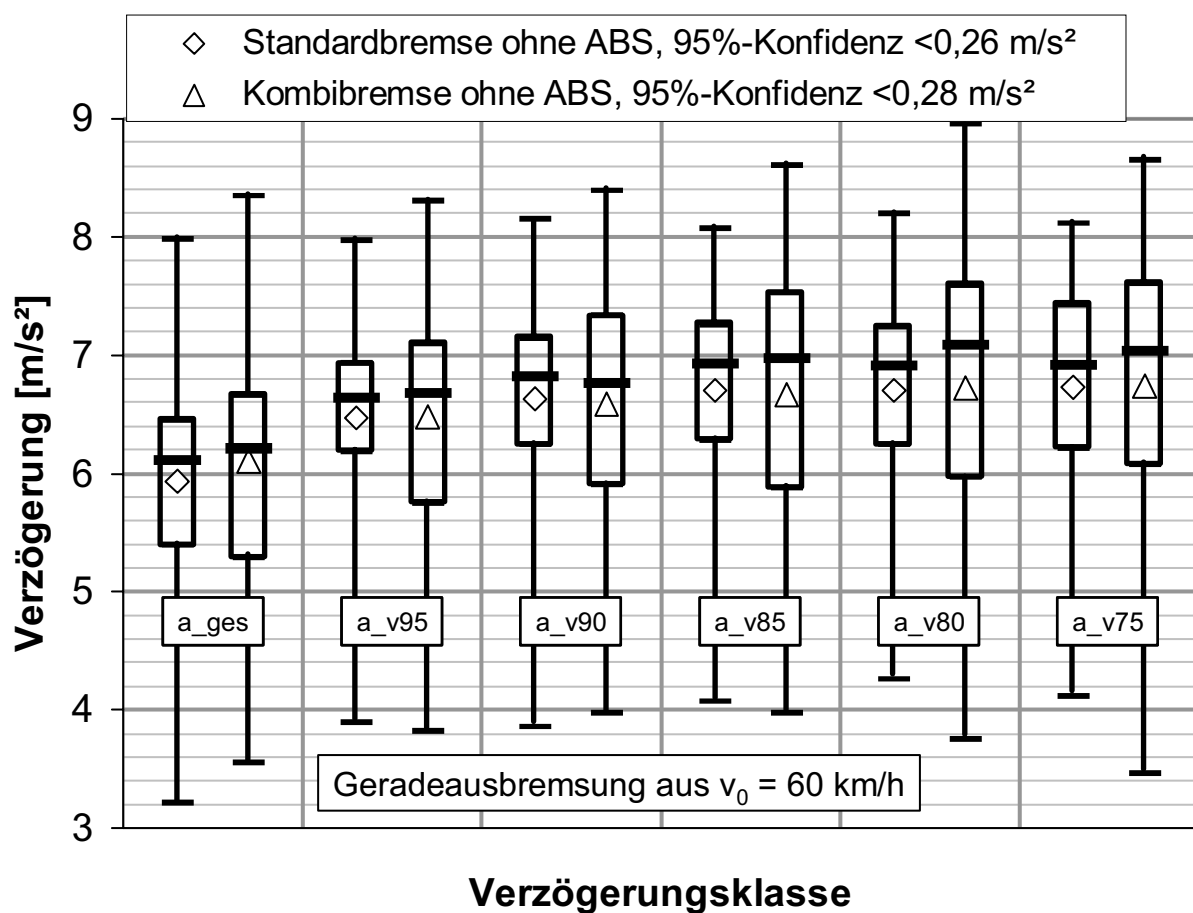


Bild 38: Zeitbezogene Verzögerung mit Standard- und Kombinationsbremssystem, jeweils ohne ABS, bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h

Wie bereits in Kapitel 2.3 dargelegt, ist die Darstellung von Bedienfehlern, die in der Auslegung der Bremse als Kombinationsbremse oder Standardbremse liegen könnten, in Versuchen auf abgesperrtem Testgelände schwierig darstellbar. Da der weit überwiegende Teil der Testpersonen keine Erfahrungen mit Kombinationsbremsanlagen hat, lautet die Arbeitshypothese

dahingehend, dass die mit Standardbremsanlage erzielten Bremsleistungen über denen mit der Kombinationsbremsanlage erzielten liegen, und dass die bei der Versuchsdurchführung mit der nicht blockiergesicherten Standardbremsanlage ermittelten Beanspruchungsgrößen niedriger sind als bei der Versuchsdurchführung mit der nicht blockiergesicherten Kombinationsbremsanlage.

Betrachtet man die Bremsverzögerung der Gesamtheit der Testpersonen bei der Geradeausbremsung mit 60 km/h, so scheint die Arbeitshypothese bereits widerlegbar, s. Bild 38.

Die Mediane und Mittelwerte der Gesamtverzögerung und der geschwindigkeitsindizierten Vollverzögerungen sind innerhalb der 99 % Konfidenzintervalle identisch. Auch bei einem Signifikanzniveau von 10 % kann kein signifikanter Zusammenhang bestätigt werden. Die Streubreite zwischen 1. und 3. Quartil der Verzögerung ist bei der Bremsung mit der nicht blockiergesicherten Kombibremse tendenziell größer, dies ist jedoch nicht signifikant.

Diese Streubreite erscheint beim Vergleich derselben Bremssysteme bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h umgekehrt bei der Standardbremse tendenziell größer zu sein als bei der Kombinationsbremsanlage, jeweils ohne ABS, s. Bild 39.

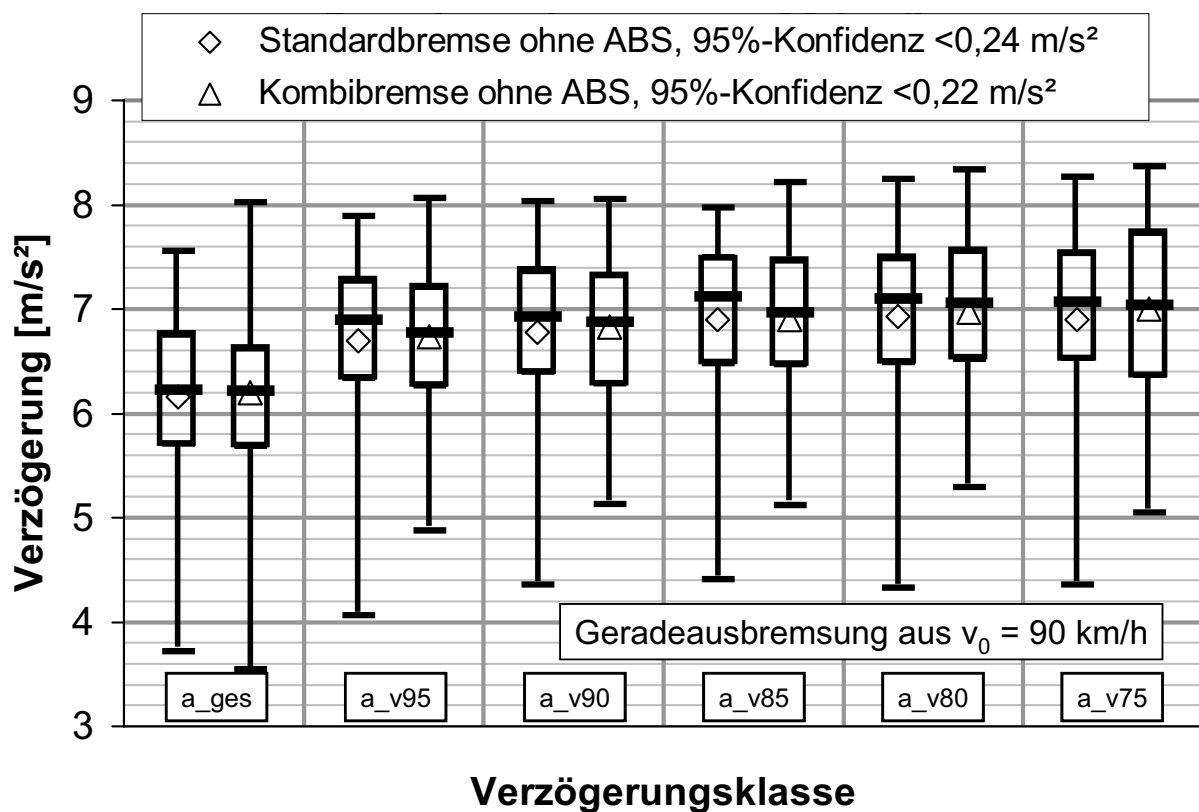


Bild 39: Zeitbezogene Verzögerung mit Standard- und Kombinationsbremssystem, jeweils ohne ABS, bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h

Ansonsten gleicht das Ergebnis qualitativ und auch quantitativ dem der Geradeausbremsung aus 60 km/h sowohl relativ zueinander als auch in seiner absoluten Aussage. Die Arbeitshypothese ist falsifiziert.

Bezüglich des Betrags der Gesamtverzögerung können die Testpersonen bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h mit dem Kombinationsbremssystem ohne ABS tendenziell höhere Gesamtverzögerungen aufbringen als mit dem nicht blockiergesicherten Standardbremssystem, s. Bild 40. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Die absolute Höhe der erreichten Verzögerungen liegt hoch signifikant unter denen der Geradeausbremsungen.

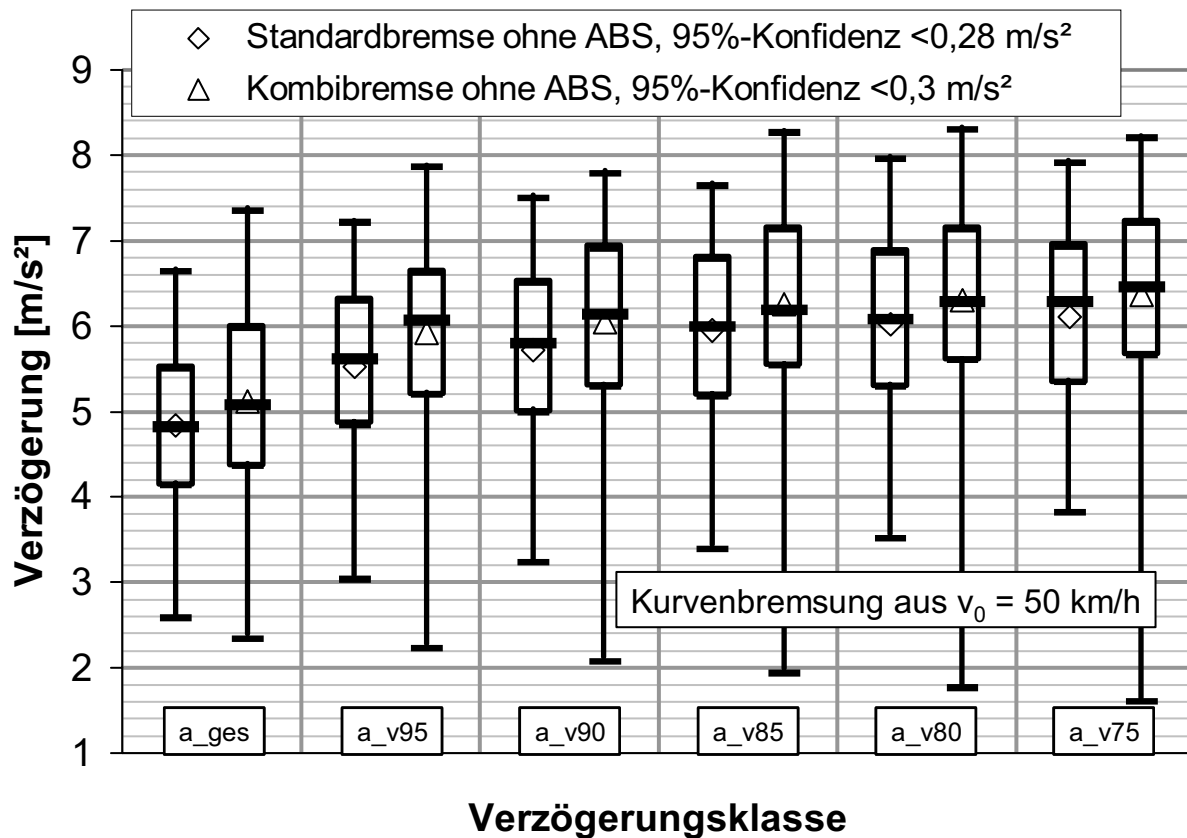


Bild 40: Zeitbezogene Verzögerung mit Standard- und Kombinationsbremssystem, jeweils ohne ABS, bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h

Im Gegensatz zu den bei den Geradeausbremsungen erzielten Bremsleistungen ist bei der Kurvenbremsung die Trennung zwischen Einleitungs- und Vollverzögerungsphase bei ca. 85 % der Ausgangsgeschwindigkeit bei der Bremsung mit dem Standardbremssystem ohne ABS und bei ca. 95 % der Ausgangsgeschwindigkeit beim Kombinationsbremssystem ohne ABS vorzunehmen. Die jeweils vom 1. und 3. Quartil eingegrenzten Streubreiten der Vollverzögerung und der geschwindigkeitsindizierten Verzögerungen sind gleich groß.

Demnach ist die Hypothese 4, wonach die von den Testpersonen mit einem Standardbremssystem ohne Blockierverhinderer erzielten Vollverzögerungen größer sind als die mit einem Kombinationsbremssystem ohne Blockierverhinderer erzielten, abzulehnen.

Eine Betrachtung der physischen Beanspruchungsgrößen im Vergleich zwischen Standard- und Kombinationsbremssystem zeigt Bild 41.

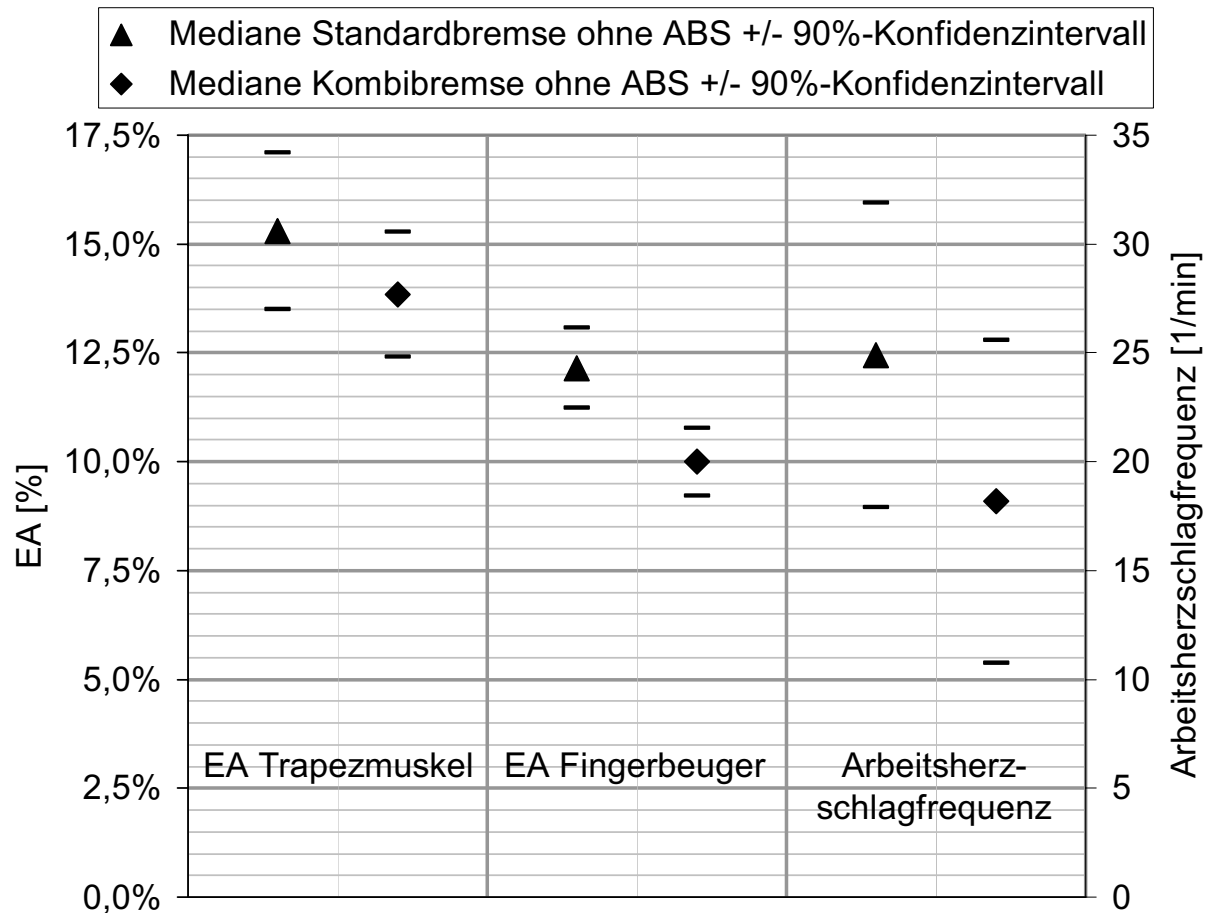


Bild 41: Beanspruchungsgrößen bei der Versuchsdurchführung mit Standard- und Kombinationsbremsanlage, jeweils ohne ABS

Der intraindividuelle Vergleich aller Testpersonen über die Versuchsdurchführung mit jeweils nicht blockiergesichertem Standard- und Kombinationsbremssystem zeigt bei der elektrischen Aktivität des Trapezmuskels und bei der Arbeitsherzschlagfrequenz keine signifikanten Unterschiede. Tendenziell ist zu beobachten, dass die Mediane der genannten Beanspruchungsgrößen bei der Versuchsdurchführung mit einem nicht blockiergesicherten Standardbremssystem größer sind als bei einem ebenfalls nicht blockiergesicherten Kombinationsbremssystem. Aufgrund der im Betrag gleich großen erreichten Bremsverzögerungen mit den genannten Bremssystemen ergeben sich auch durch eine parallele Betrachtung der Verzögerungen zu der Arbeitsherzschlagfrequenz keine weitergehenden Erkenntnisse.

Die elektrische Aktivität des Hauptschließmuskels der linken Hand hingegen weist signifikant höhere Mediane bei der Verwendung des Standardbremssystems gegenüber dem Kombinationsbremssystem auf. Daher wird die Hypothese 7, nach der die Beanspruchung bei der Versuchsdurchführung mit dem Standardbremssystem geringer ist als mit dem Kombinationsbremssystem, abgelehnt. Wie beim Vergleich der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit und ohne Blockierverhinderer ist festzustellen, dass die psychische Belastung durch die Verwendung eines nicht blockiergesicherten Standardbremssystems im Rahmen der Ver-

suchsdurchführung tendenziell höher ist als die psychische Belastung durch die Verwendung eines nicht blockiergesicherten Kombinationsbremssystems.

4.1.3 Einhebel- und konventionell zweihebelbedientes Kombinationsbremssystem mit ABS

Hydraulisch, mechanisch und elektronisch unterscheidet das mit nur dem Handbremshebel bediente, serienmäßig am Versuchsmotorrad vorhandene, blockiergesicherte Kombinationsbremssystem nichts vom in dieser Arbeit verwendeten, einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem. Durch die Entfernung des Fußbremshebels wird jedoch sichergestellt, dass die Testperson sich nur auf die Betätigung des Handbremshebels beschränkt und auch nur für die Bedienung eines Hebels geistige Ressourcen frei zu halten braucht. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Testpersonen auch bei der Versuchsdurchführung mit dem serienmäßigen, mit zwei Bremsbetätigungseinrichtungen ausgestatteten und blockiergesicherten Kombinationsbremssystem nur den Handbremshebel betätigt haben.

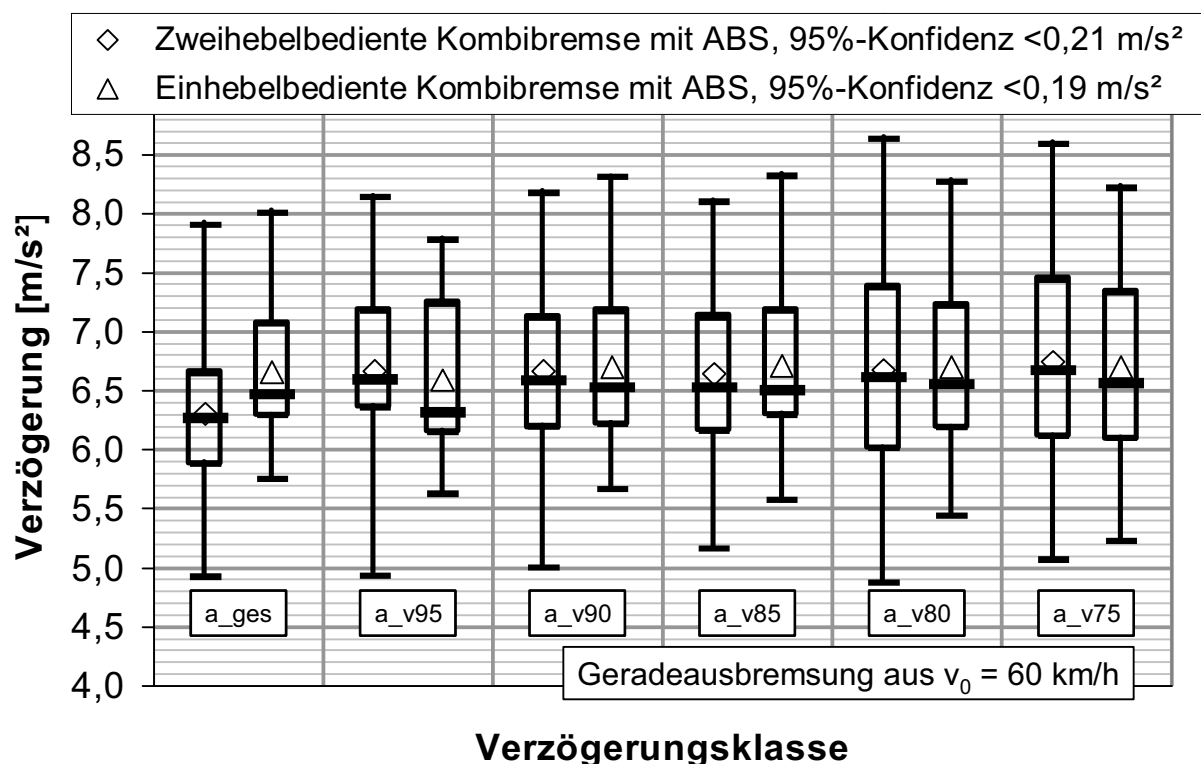


Bild 42: Zeitbezogene Verzögerung mit einhebelbedientem und zweihebelbedientem Kombinationsbremssystem mit ABS bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h

Die Beträge der Mediane der Vollverzögerungen der Testpersonen bei der Geradeausbremsung mit 60 km/h liegen beim Vergleich der Bremsbetätigung über beide Betätigungshebel mit der über nur den Handbremshebel innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls auf gleichem

Niveau, s. Bild 42; auch der Mittelwert der mit nur einem Hebel erzielten Gesamtverzögerung liegt nicht signifikant über dem der konventionell mit zwei Hebeln erzielten.

Auch bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h unterscheiden sich die Mediane der Gesamtverzögerung nach der Art der Bremsbetätigung nicht hoch signifikant, wohl aber die Mittelwerte der Gesamtverzögerung, s. Bild 43. Die Verläufe der Gesamtverzögerungen und der geschwindigkeitsindizierten Vollverzögerungen zeigen, dass der Verzögerungsaufbau mit nur dem Handbremshebel von den Testpersonen schneller gestaltet wird als mit beiden Bremshebeln.

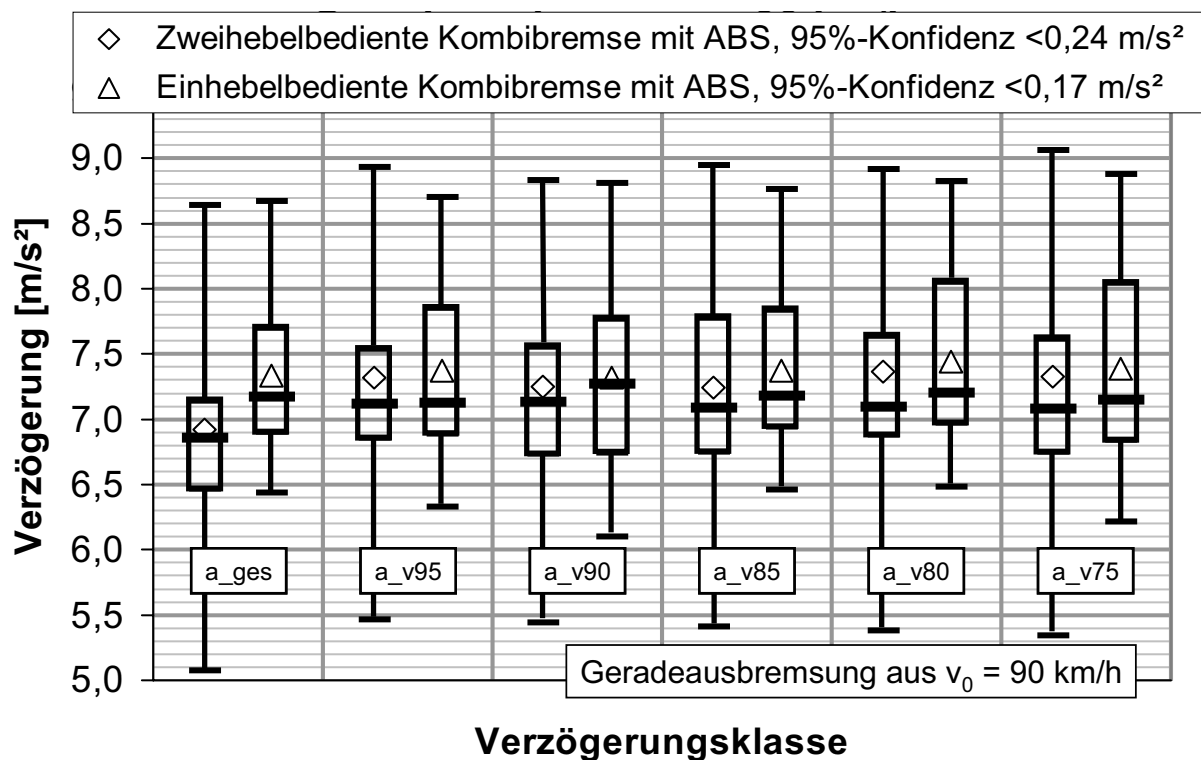


Bild 43: Zeitbezogene Verzögerung mit einhebelbedientem und zweihebelbedientem Kombinationsbremssystem mit ABS bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h

Der Vergleich der von den Testpersonen bei der Kurvenbremsung mit 50 km/h unter Variation der Bedienschnittstelle mit einer blockiergesicherten Kombinationsbremsanlage erzielten Gesamtverzögerungen zeigt eine signifikant höhere Gesamtverzögerung für den Fall, dass den Testpersonen nur der Handbremshebel zur Betätigung der Bremse zur Verfügung steht, s. Bild 44.

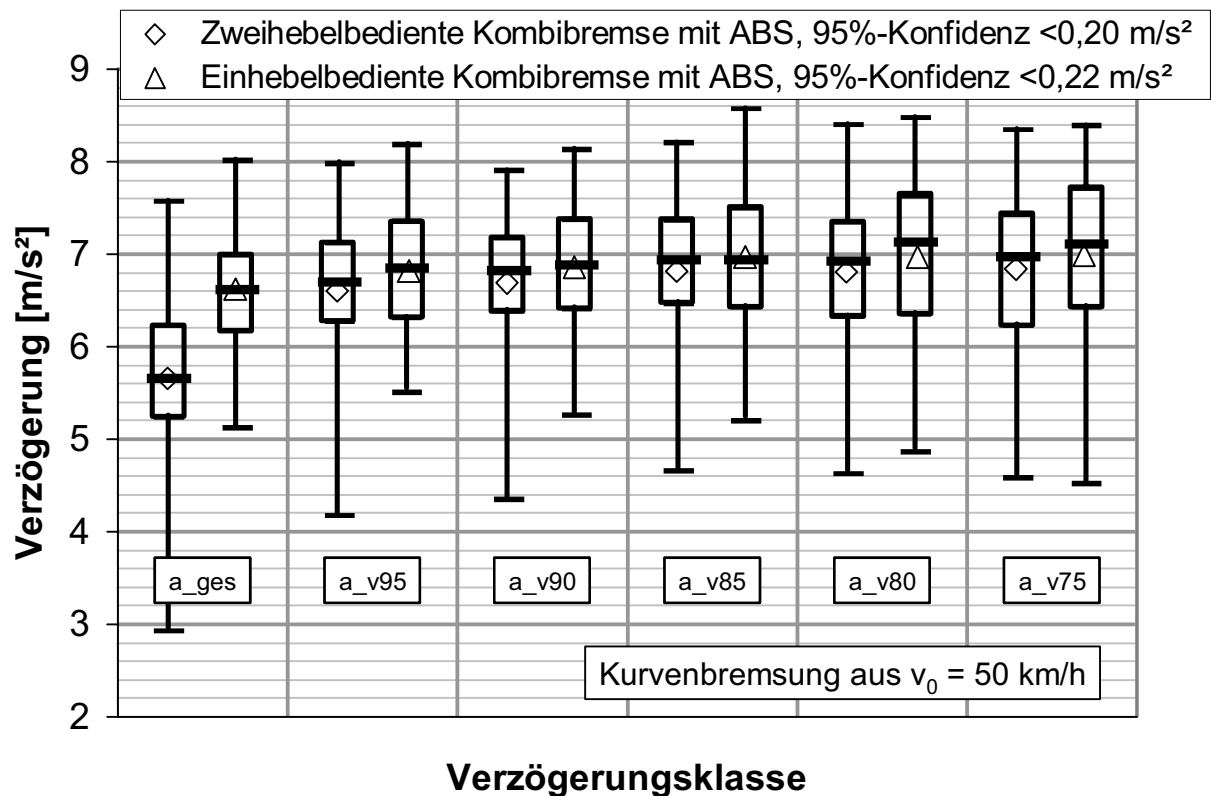


Bild 44: Zeitbezogene Verzögerung mit einhebelbedientem und zweihebelbedientem Kombinationsbremssystem mit ABS bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h

Hypothese 5, wonach die von den Testpersonen mit der nur über den Handbremshebel bedienbaren Kombinationsbremsanlage erreichten Verzögerungen betragsmäßig gleich den mit der konventionell über Hand- und Fußbremshebel bedienbaren, blockiergesicherten Kombinationsbremsanlage erzielten Verzögerungen liegen, ist daher abzulehnen. Eine mögliche Erklärung für diesen signifikanten Unterschied ist die geringere psychische Beanspruchung der Testpersonen beispielsweise durch die fehlende Wahlmöglichkeit der Betätigungseinrichtung, eine andere die haptisch günstigere Anbindung des Fahrers an das Bremssystem des Versuchsmotorrads, welche die Dosierung der Bremskraft erleichtert.

Bild 45 zeigt die physischen Beanspruchungsgrößen bei der Versuchsdurchführung mit dem blockiergesicherten Kombinationsbremssystem unter Variation der Betätigungseinrichtung.

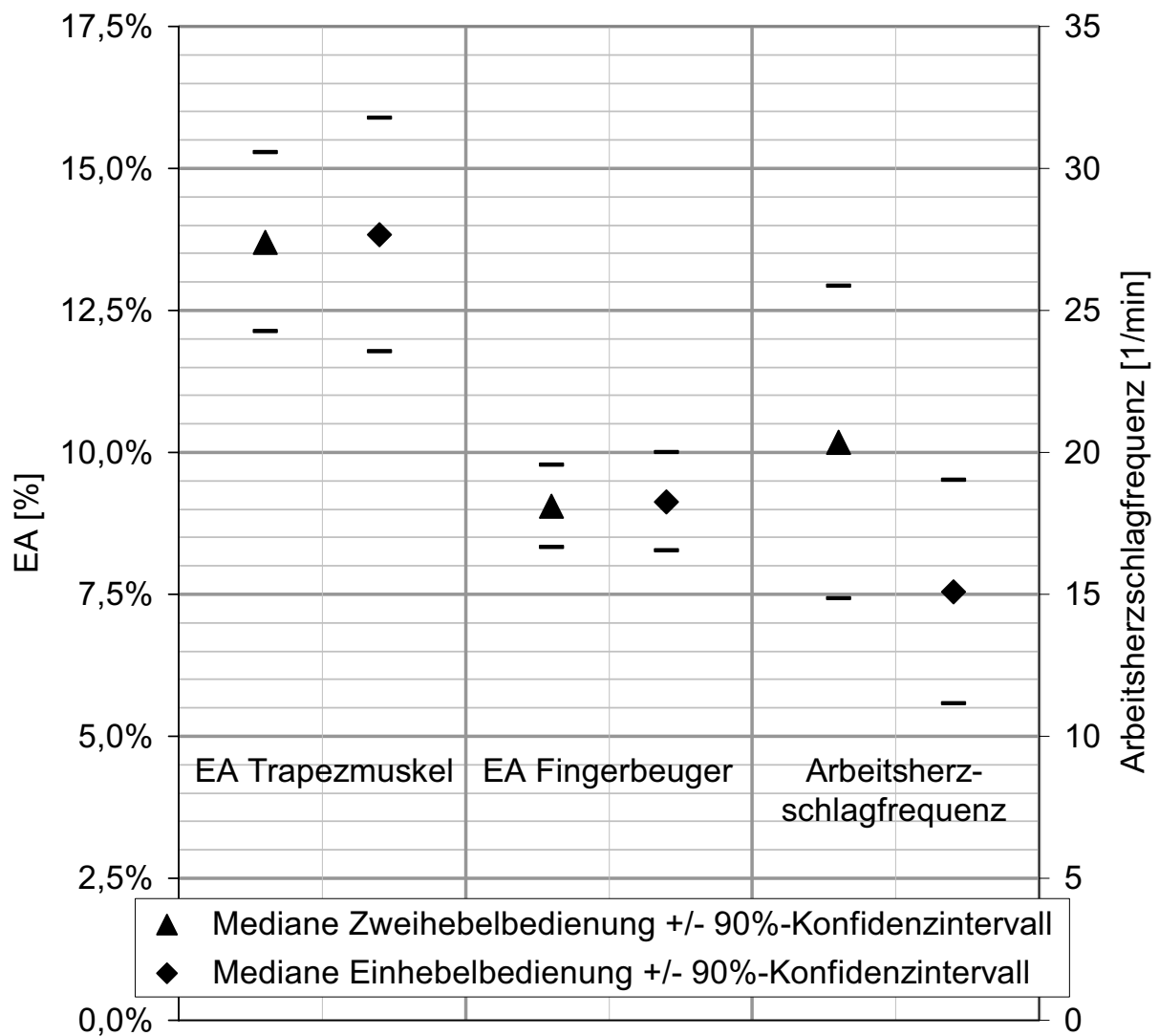


Bild 45: Physische Beanspruchungsgrößen der Gesamtheit der Testpersonen während der Versuchsdurchführung mit mittels einem oder zwei Bremshebeln bedienbarem, blockiergesichertem Kombinationsbremssystem

Die Beanspruchungsgrößen befinden sich im Vergleich zu anderen Bremssystemen auf niedrigem Niveau, vgl. Bild 41, und die elektrische Aktivität liegt bei beiden Betätigungsarten gleichauf. Die Arbeitsherzschlagfrequenz ist bei der Bedienmöglichkeit nur des Handbremshebels tendenziell geringer als bei der konventionellen Bedienung über zwei Betätigungseinrichtungen.

Da die technischen Gegebenheiten der Bremssysteme abgesehen vom fehlenden Fußbremshebel identisch sind und die physischen Belastungsgrößen ebenfalls nicht signifikant voneinander abweichen, ist die Hypothese 8, wonach die psychische Beanspruchung der Testpersonen bei Bremsungen mit der nur über den Handbremshebel bedienbaren Kombinationsbremsanlage gleich der bei Bremsungen mit der konventionell über Hand- und Fußbremshebel bedienbaren, blockiergesicherten Kombinationsbremsanlage ist, abzulehnen.

4.2 Interindividuelle Betrachtung

4.2.1 Fahraufgabe

Die interindividuelle Betrachtung der Bremsleistungen und physiologischen Beanspruchungsgrößen wird klären, ob individuelle Merkmale wie beispielsweise die Gesamtfahrfahrung der Testpersonen einen Einfluss auf die betrachteten Größen haben. Es werden die Hypothese 1, der die Überlegung zugrunde liegt, dass die Höhe der Gesamtverzögerung weitgehend unabhängig von der Fahraufgabe ist, und die Hypothese 2, wonach sie bei Bremsungen mit ABS unabhängig von der Gesamtfahrfahrung der Testpersonen ist, untersucht. In Bild 46 sind interindividuell absteigend nach der Gesamtfahrfahrung für jeden Fahrer die nach Fahraufgabe sortierten statistischen Kennwerte der Gesamtverzögerung dargestellt.

Zur besseren Orientierung sind nach Fahraufgaben getrennt Mediane der Gesamtverzögerung über jeweils die drei Testpersonen mit der größten und der geringsten Gesamtfahrfahrung eingezeichnet. Bei allen Testpersonen ist die Gesamtverzögerung bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h größer als die bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h und diese wiederum größer als die erzielten Gesamtverzögerungen bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h. Die ohnehin niedrigen Verzögerungen bei der Kurvenbremsung nehmen mit abnehmender Gesamtfahrfahrung stärker ab als die mittleren, bei den Geradeausbremsungen erzielten Gesamtverzögerungen. Es ist auffällig, dass die erfahrenste Testperson nicht nur die mit Abstand höchsten Verzögerungen erreicht, sondern dass vor allem die Minima der Verzögerungen sehr hoch liegen. Ihre Gesamtfahrfahrung beträgt ungefähr das Dreifache dessen, was die Testperson 6 als nächste in der Erfahrungsrangfolge an Gesamtfahrfahrung vorzuweisen hat. Die Testpersonen 6, 7, 8 und 9 haben Gesamtfahrfahrungen zwischen 36.000 km und 70.000 km, und während die mittleren Verzögerungen vergleichsweise hoch sind mit Ausnahme der der Testperson 8, sind die Minima auf einem besonders niedrigen Verzögerungsniveau. Mit ähnlichen Fahrerfahrungen belegt wie die Testpersonen bei den Untersuchungen von Post¹⁵², kommt es wie dort beschrieben bei den Bremsversuchen der Testpersonen 7, 6 und 9 zu zahlreichen Vorderradblockaden, glücklicherweise ohne realen Sturz. Die Testpersonen 6 und 7 zeichnen jeweils für eine sturzrelevante Situation verantwortlich. In der Regel verlängert sich bei einer Vorderradblockade der Bremsweg, da der Fahrer zunächst gezwungen ist, die Vorderradbremskraft abzubauen und, sobald das Rad wieder frei rollt, erneut die Bremsung einleitet. Die Testperson 8 nimmt insofern eine Sonderstellung unter den Testpersonen ein, als dass sie als einzige weder ihr privates Motorrad noch ihren Fahrstil als sportlich einschätzt. Im FRF Risikofragebogen fällt sie durch ihren verglichen mit den anderen Testpersonen geringen Hang zum Risiko in den drei Risikoarten auf. Die Gesamtfahrfahrung kann, wie in Kapitel

¹⁵² Post et al. 1984: Kombibremse Motorrad, S. 30

2.4 dargestellt, nur einen – dafür aber einfach quantifizierbaren – Teil der Fahrerpersönlichkeit abbilden.

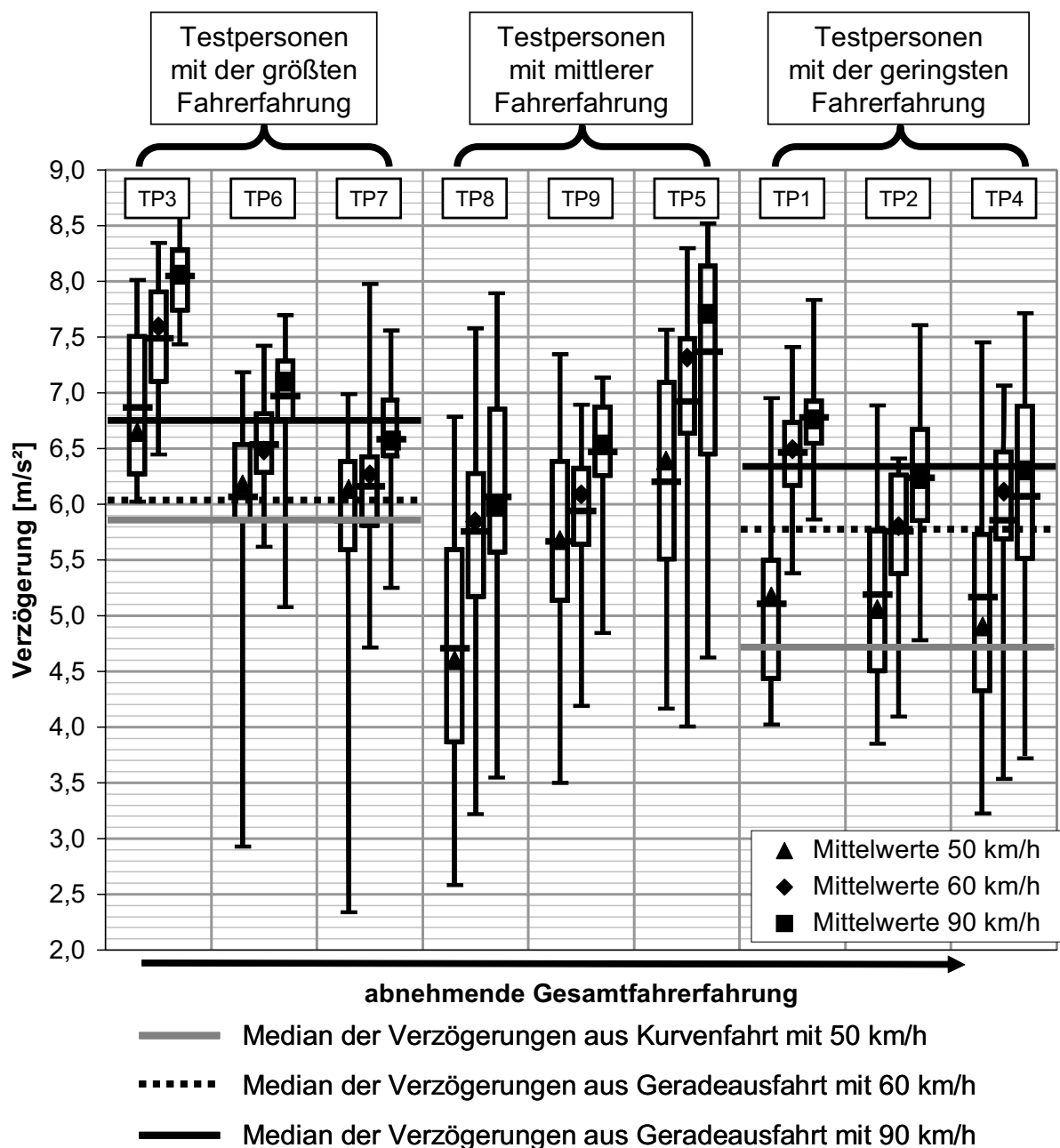


Bild 46: Gesamtverzögerungen der absteigend nach Gesamtfahrerfahrung aufgestellten Testpersonen, interindividuell nach Fahraufgabe sortiert

4.2.2 Vorhandensein eines Blockierverhinderers

Als vergleichsweise einfache Fahraufgabe hat sich die Geradeausbremsung aus 60 km/h dargestellt, vgl. Kapitel 4.2.1. Trägt man die interindividuell erzielten Bremsleistungen mit und ohne ABS über den nach Gesamtfahrerfahrung absteigend sortierten Testpersonen auf, so

wird deutlich, dass ABS vor allem den weniger erfahrenen Testpersonen hilft, bessere Bremsleistungen zu erzielen, s. Bild 47. Während die drei erfahrensten Testpersonen ohne ABS sogar tendenziell höhere Verzögerungen erzielen als mit ABS, ist dies bei den sechs anderen Testpersonen umgekehrt, bei zweien davon werden sogar signifikant höhere Verzögerungen mit ABS erzielt als ohne.

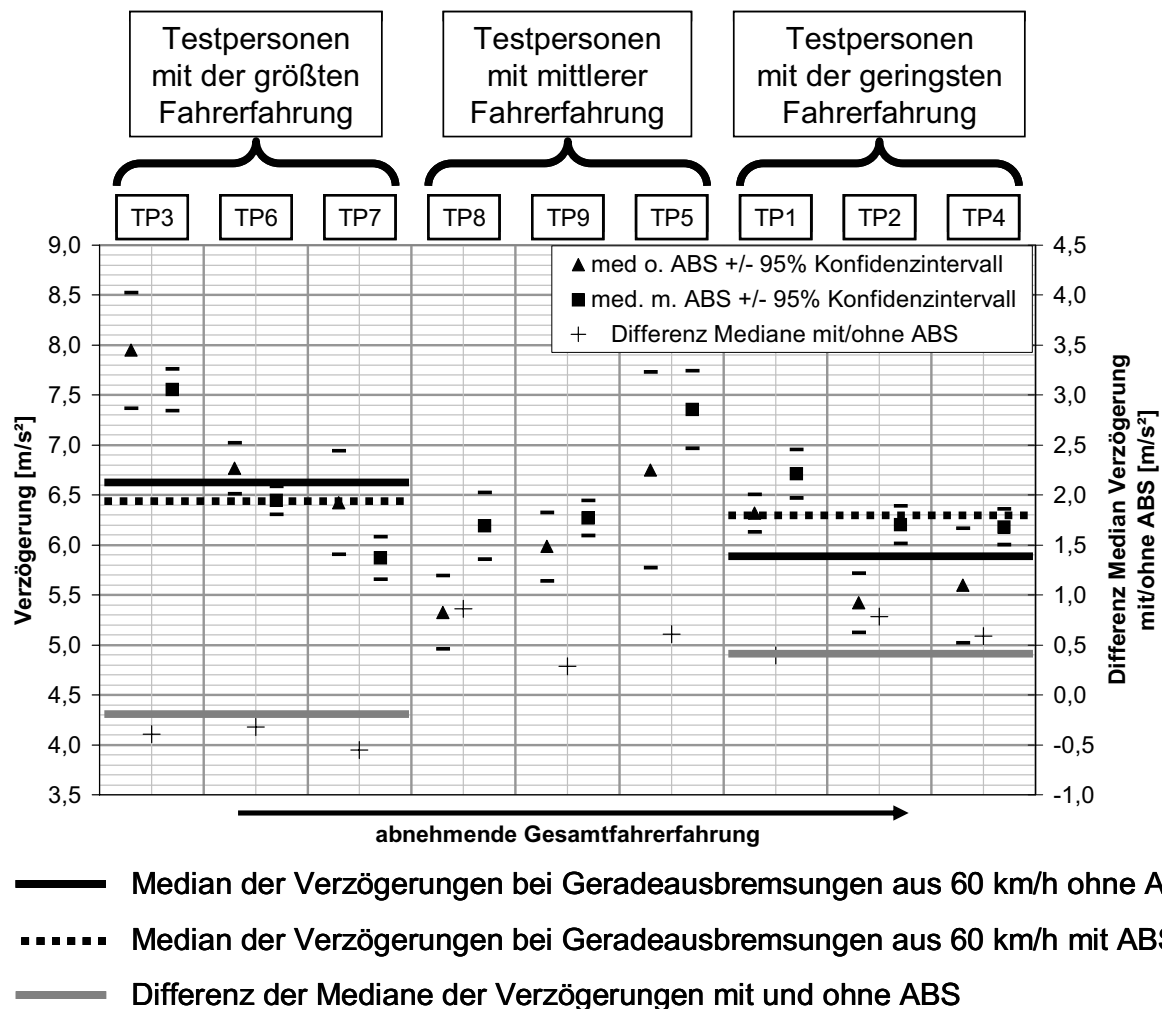


Bild 47: Mediane der Gesamtverzögerung bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h ohne und mit ABS und deren Differenz, aufgetragen über der qualitativen Gesamtfahrerfahrung der Testpersonen

Die Beträge der Konfidenzintervalle sind umso größer, je weniger reproduzierbar die Bremsleistung abgegeben wird. Mit ABS sind die Konfidenzintervalle geringer als ohne ABS.

Die Differenz zwischen der Gesamtverzögerung und der Vollverzögerung aus 95 % der Ausgangsgeschwindigkeit kann als Maß für den Verzögerungsaufbau durch die Testpersonen betrachtet werden. Je größer die Differenz der genannten Verzögerungen, desto länger (sowohl zeitlich als auch überproportional in Bezug auf den zurückgelegten Weg) wird die Ausgangsgeschwindigkeit zu Beginn der Bremsung aufrechterhalten und Bremsweg verschenkt.

In Bild 48 ist diese Verzögerungsdifferenz für die Geradeausbremsungen aus 60 km/h mit und ohne ABS über der qualitativen Gesamtfahrerfahrung der Testpersonen aufgetragen.

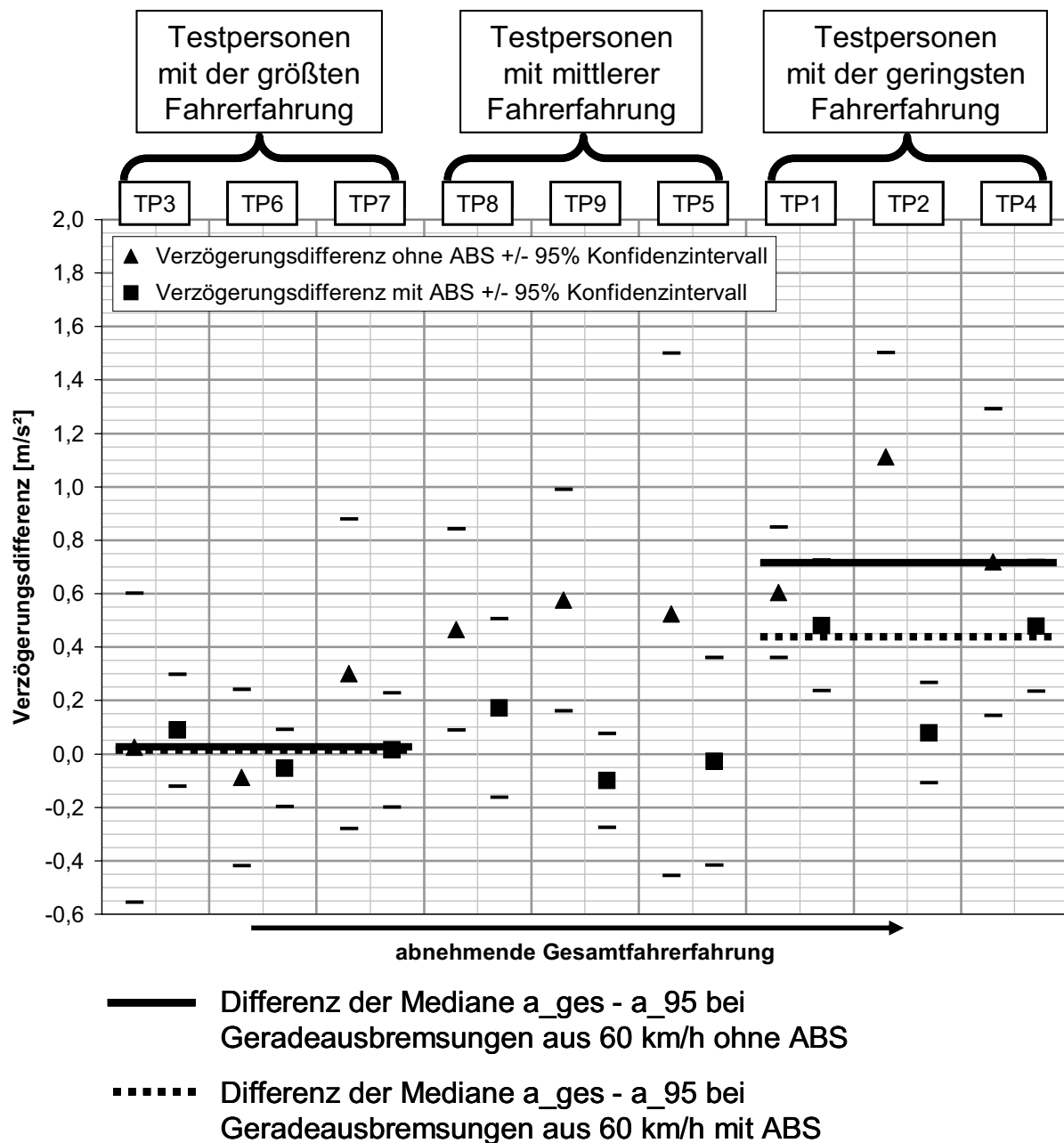


Bild 48: Differenz von Gesamtverzögerung und der Vollverzögerung aus 95 % der Ausgangsgeschwindigkeit ohne und mit ABS bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h

Es wird der Trend deutlich, dass das Vorhandensein eines ABS dazu beiträgt, dass vor allem weniger erfahrene Fahrer einen teilweise signifikant schnelleren Verzögerungsaufbau und damit potenziell auch eine höhere Gesamtverzögerung erreichen können. Weiterhin sind die Konfidenzintervalle der Verzögerungsdifferenzen ohne ABS sehr viel größer als mit ABS, was auf eine größere Streubreite dieses betrachteten Teils der Bremsleistungen schließen lässt.

Bereits bei einer leichten Erhöhung des Schwierigkeitsgrads durch die Steigerung der Ausgangsgeschwindigkeit ist bei allen Testpersonen mit Ausnahme der Testperson 6 die Gesamtverzögerung mit ABS signifikant größer als ohne ABS, s. Bild 49.

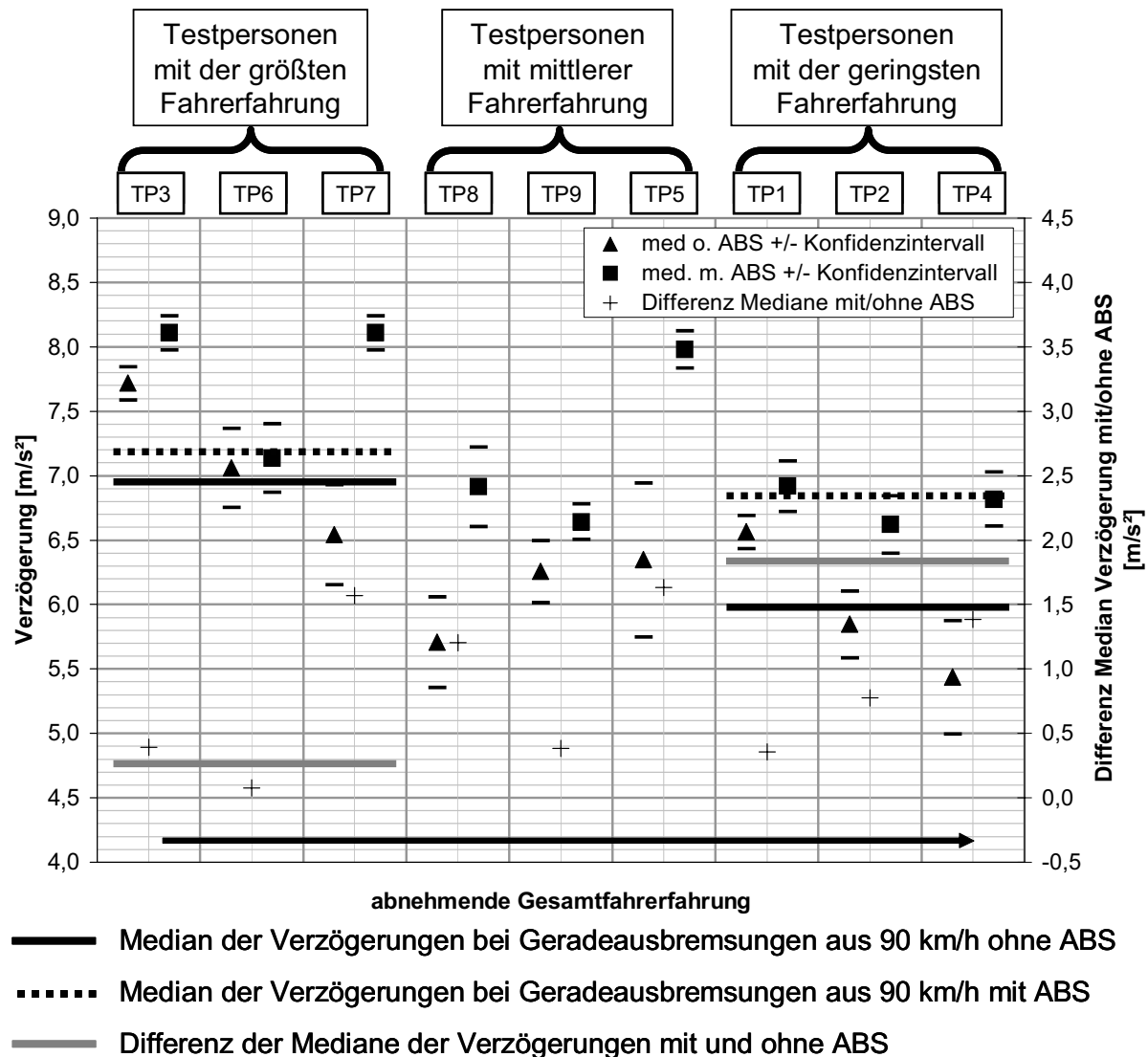


Bild 49: Mediane der Gesamtverzögerung ohne und mit ABS und deren Differenz bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h

Wie auch schon in anderen Veröffentlichungen¹⁵³ beschrieben, sind auch die erzielten Gesamtverzögerungen mit ABS von der Gesamtfahrerfahrung abhängig, obwohl das ABS als Fahrerassistenzsystem nicht viel mehr als einen zügigen Bremsdruckaufbau auf ein hohes Druckniveau erfordert, um gleichmäßig hohe Bremsleistungen zu erzielen. Während bei der ABS-geregelten Geradeausbremsung aus 60 km/h die Testperson 3 über 1 m/s^2 höhere Gesamtverzögerungen als die anderen Testpersonen aufbringt, so sind es bei der Geradeaus-

¹⁵³ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 117

bremsung aus 90 km/h bereits zwei weitere Testpersonen, die ebenso hohe Verzögerungen aufbringen wie die außerordentlich erfahrene Testperson 3, die darüber hinaus auch die einzige Testperson ist, die Erfahrung mit mit ABS ausgestatteten Motorrädern hat (ca. 70.000 km).

Zum Vergleich zwischen den Fahraufgaben und deren Schwierigkeitsgrad seien noch die bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h erzielten Gesamtverzögerungen dargestellt, s. Bild 50.

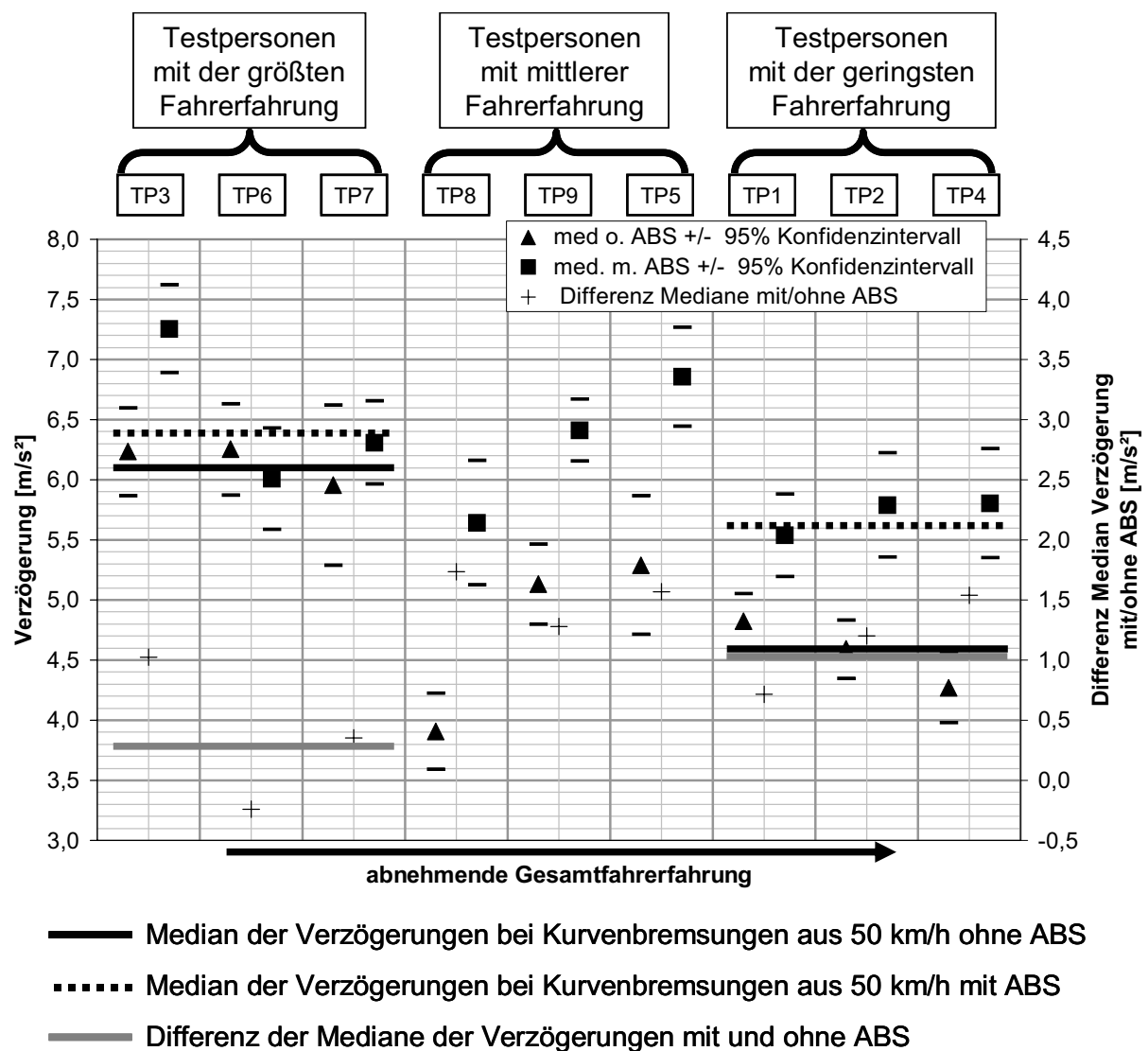


Bild 50: Mediane der Gesamtverzögerung ohne und mit ABS und deren Differenz bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h

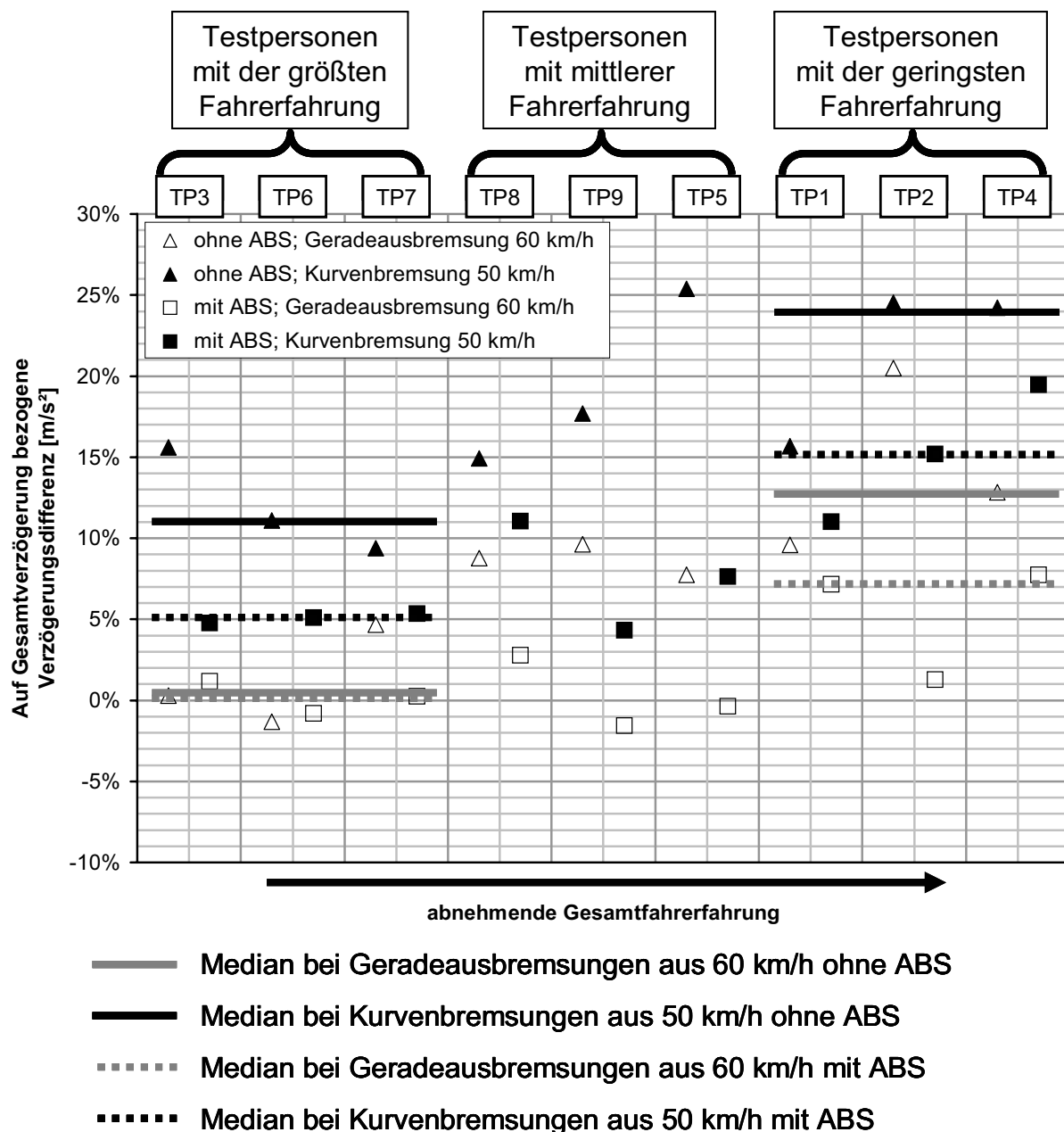


Bild 51: Auf Gesamtverzögerung bezogene Differenz zwischen Gesamtverzögerung und Vollverzögerung aus 95 % der Ausgangsgeschwindigkeit über den absteigend nach Gesamtfahrerfahrung sortierten Testpersonen für die Geradeausbremsung aus 60 km/h und die Kurvenbremsung aus 50 km/h jeweils für Bremssysteme ohne und mit Blockierverhinderer

Obwohl die Ausgangsgeschwindigkeit der Kurvenbremsung sich ungefähr auf dem Niveau der der Geradeausbremsung aus 60 km/h befindet, sind die Ergebnisse signifikant unterschiedlich. Bei der Geradeausbremsung sind die Unterschiede in der Verzögerung mit und ohne Blockierverhinderer viel geringer als bei der Kurvenbremsung, und dies trotz des in anderen Veröffentlichungen¹⁵⁴ detailliert in Theorie und Praxis beschriebenen, mit der

¹⁵⁴ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 137

ABS-Regelung pulsierenden Bremslenkmoments, und trotz des hohen Nicht-Einsatzes von ABS bei der Kurvenbremsung mit ABS-Systemen und dem damit einhergehenden Verzögerungsverlust, vgl. Bild 36. Besonders bei den weniger erfahrenen Fahrern bedeutet also das einfache Wissen um ein vorhandenes ABS bereits eine signifikant höhere mögliche Verzögerung in der Kurve, aber auch die erfahrenste Testperson kann ihre bereits ohne ABS ohnehin vergleichsweise hohe Verzögerung bei der Kurvenbremsung mit ABS noch signifikant steigern.

Die Differenz zwischen den Medianen der von den Testpersonen erzielten Gesamtverzögerung und der Vollverzögerung aus 95 % der Ausgangsgeschwindigkeit bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h fällt gegenüber der entsprechenden Darstellung der Geradeausbremsung aus 60 km/h bei den weniger erfahrenen Testpersonen geringer aus. Dies gründet jedoch nicht in einem schnelleren Verzögerungsaufbau bei der Kurvenbremsung, sondern ist Resultat der geringen erzielten Vollverzögerungen. Je geringer die Vollverzögerung und je größer der Bremskraftgradient, desto geringer die dargestellte Differenz der Verzögerungen. In Bild 51 sind für die Kurvenbremsung und die Geradeausbremsung aus 60 km/h jeweils mit Bremssystemen mit und ohne Blockierverhinderer die Verzögerungsdifferenz auf die Gesamtverzögerung bezogen über den qualitativen Gesamtfahrerfahrungen der Testpersonen aufgetragen.

Es ist aus der Darstellung erkennbar, dass der geringste Einfluss der Fahrerfahrung der Testpersonen auf die bezogene Verzögerungsdifferenz bei der in diesem Vergleich psychisch am wenigsten belastenden Versuchsaufgabe, der Geradeausbremsung aus 60 km/h mit blockiergesicherten Bremssystemen, besteht. Ohne ABS ist sowohl der Einfluss der Gesamtfahrerfahrung der Testpersonen auf die benannte bezogene Verzögerungsdifferenz größer als mit ABS, als auch die absolute Höhe der bezogenen Verzögerungsdifferenz hin zu größeren Werten tendiert. Bei der Kurvenbremsung hat das Vorhandensein eines ABS einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der bezogenen Verzögerungsdifferenz, nicht jedoch auf die Höhe des Fahrerfahrungseinflusses, der sich auf dem Niveau der Geradeausbremsung mit 60 km/h ohne Blockierverhinderer befindet.

Die Gesamtfahrerfahrung und das Merkmal ABS vs. kein ABS haben laut entsprechender Hypothese einen zu untersuchenden Einfluss auf die gemessenen physischen Beanspruchungsdaten. In Erweiterung zu den in Kapitel 2.6 bezüglich der Projektion psychischer Beanspruchung auf physische Beanspruchungsdaten dargestellten Zusammenhängen zwischen arbeitshypothetisch fehlendem Einfluss der Merkmale der Bremssysteme auf physische Beanspruchungsdaten ist auch der Einfluss der Gesamtfahrerfahrung auf die physische Beanspruchung als vornehmlich aus der psychischen Beanspruchung gründend anzunehmen.

Die elektrische Aktivität des Hauptschließmuskels der linken Hand hat sich als ein zum Nachweis psychischer Beanspruchung geeigneter indirekter Indikator herausgestellt. Entscheidend dabei ist nicht die relative Höhe des prozentualen Werts der elektrischen Aktivität, sondern die Differenz im schwarz/weiß-Vergleich. Die interindividuelle Darstellung der elektrischen Aktivität zeigt Bild 52. Bei allen Testpersonen ist der Wert bei der Versuchsdurchführung ohne ABS höher als der entsprechende Wert mit ABS, bei den drei

gemessen an der Gesamtfahrerfahrung am wenigsten erfahrenen Testpersonen ist die physische Beanspruchungsgröße EA des Hauptschließmuskels der linken Hand bei der Versuchsdurchführung mit ABS signifikant größer als bei der Versuchsdurchführung ohne ABS.

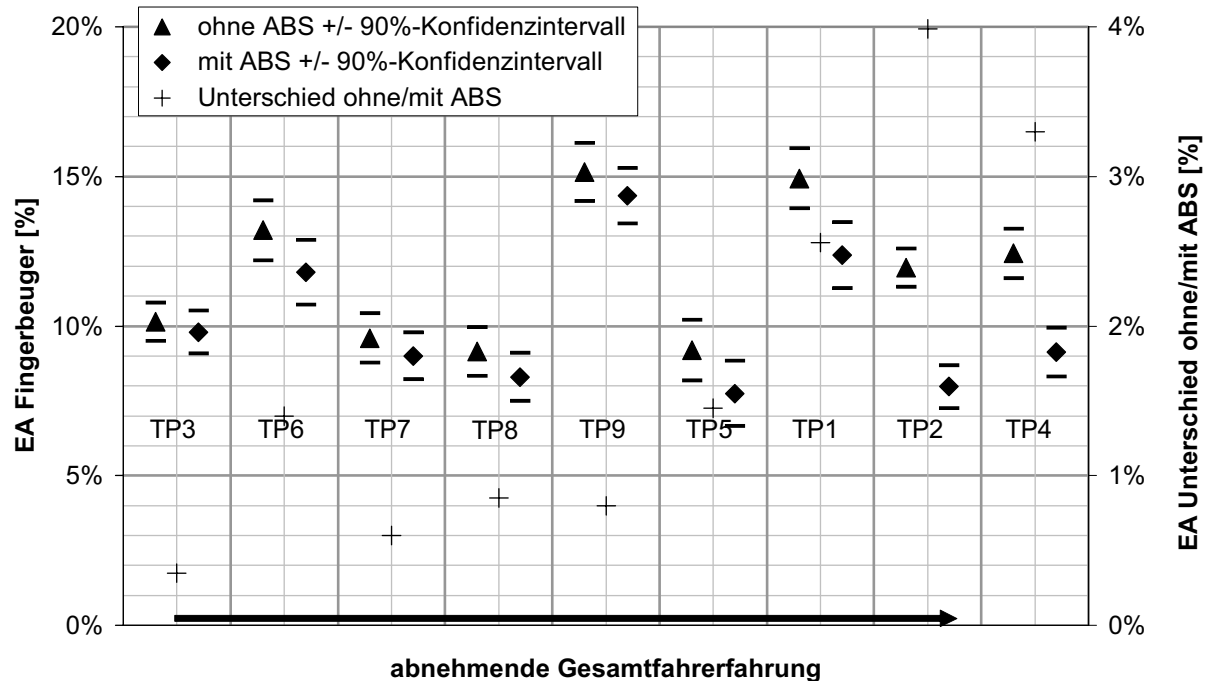


Bild 52: Elektrische Aktivität des *musculus flexor digitorum superficialis* der linken Hand und deren Differenz bei der Versuchsdurchführung ohne und mit ABS über den nach Gesamtfahrerfahrung absteigend sortierten Testpersonen

Die elektrische Aktivität des Trapezmuskels liefert bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen ohne ABS bei allen Testpersonen höhere Werte als bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen mit ABS, jedoch ist dieser Unterschied nur bei den am wenigsten erfahrenen Testpersonen signifikant. Die Differenz der Mediane ist bei den weniger erfahrenen Testpersonen größer als bei den erfahrenen. Die Arbeitsherzschlagfrequenz liefert nur für zwei der Testpersonen signifikante Unterschiede bezüglich der Versuchsdurchführung mit und ohne ABS, s. Bild 53. Das Phänomen auf psychische Beanspruchung mit einer signifikanten Änderung der Arbeitsherzschlagfrequenz reagierender und nicht reagierender Testpersonen überlagert sich mit der aufgrund der teilweise signifikant höheren erreichten Verzögerung größeren physischen Belastung bei Bremsungen mit ABS und der sich aus den anderen Messgrößen ergebenden höheren psychischen Beanspruchung jeweils vor allem der weniger erfahrenen Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit Bremssystemen ohne ABS. Trotz der benannten überlagerten Einflüsse ist die Differenz der Arbeitsherzschlagfrequenzen bei der Versuchsdurchführung mit und ohne ABS bei den erfahreneren Testpersonen tendenziell geringer als bei den weniger erfahrenen Testpersonen.

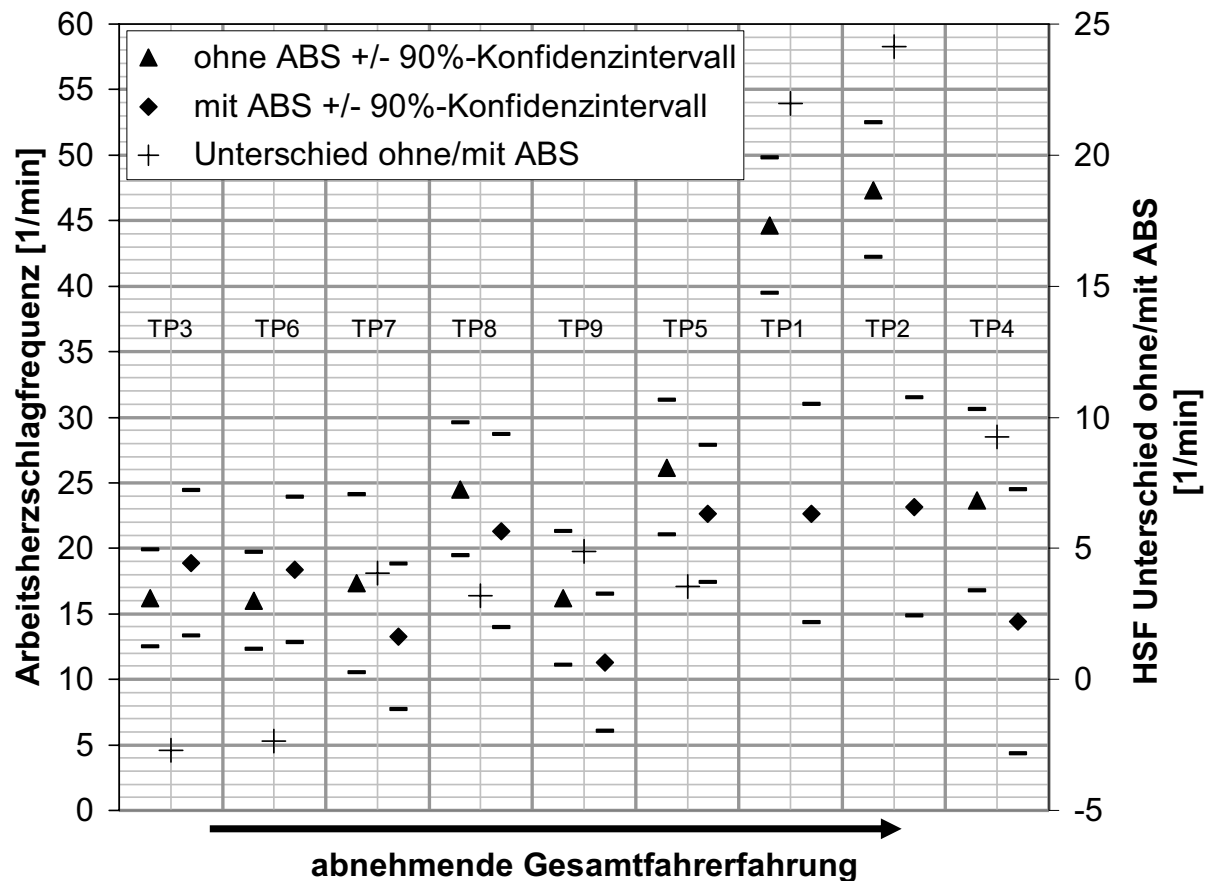


Bild 53: Arbeitsherzschlagfrequenz und deren Differenz bei der Versuchsdurchführung ohne und mit ABS über den nach Gesamtfahrerfahrung absteigend sortierten Testpersonen

4.2.3 Standard- und Kombinationsbremsanlage

Die intraindividuell dargestellten Einflüsse der Merkmale Standard- und Kombinationsbremsanlage jeweils ohne Blockierverhinderer ergeben interindividuell keinen weiteren Erkenntnisgewinn. Während intraindividuell die elektrische Aktivität des Hauptschließmuskels bei der Versuchsdurchführung mit dem nicht blockiergesicherten Standardbremssystem signifikant über dem bei der Versuchsdurchführung mit dem nicht blockiergesicherten Kombinationsbremssystem liegt, ist dies interindividuell aufgrund des geringeren Datenumfangs nur tendenziell zu bestätigen.

4.2.4 Einhebel- und konventionell zweihebelbedientes Kombinationsbremssystem mit ABS

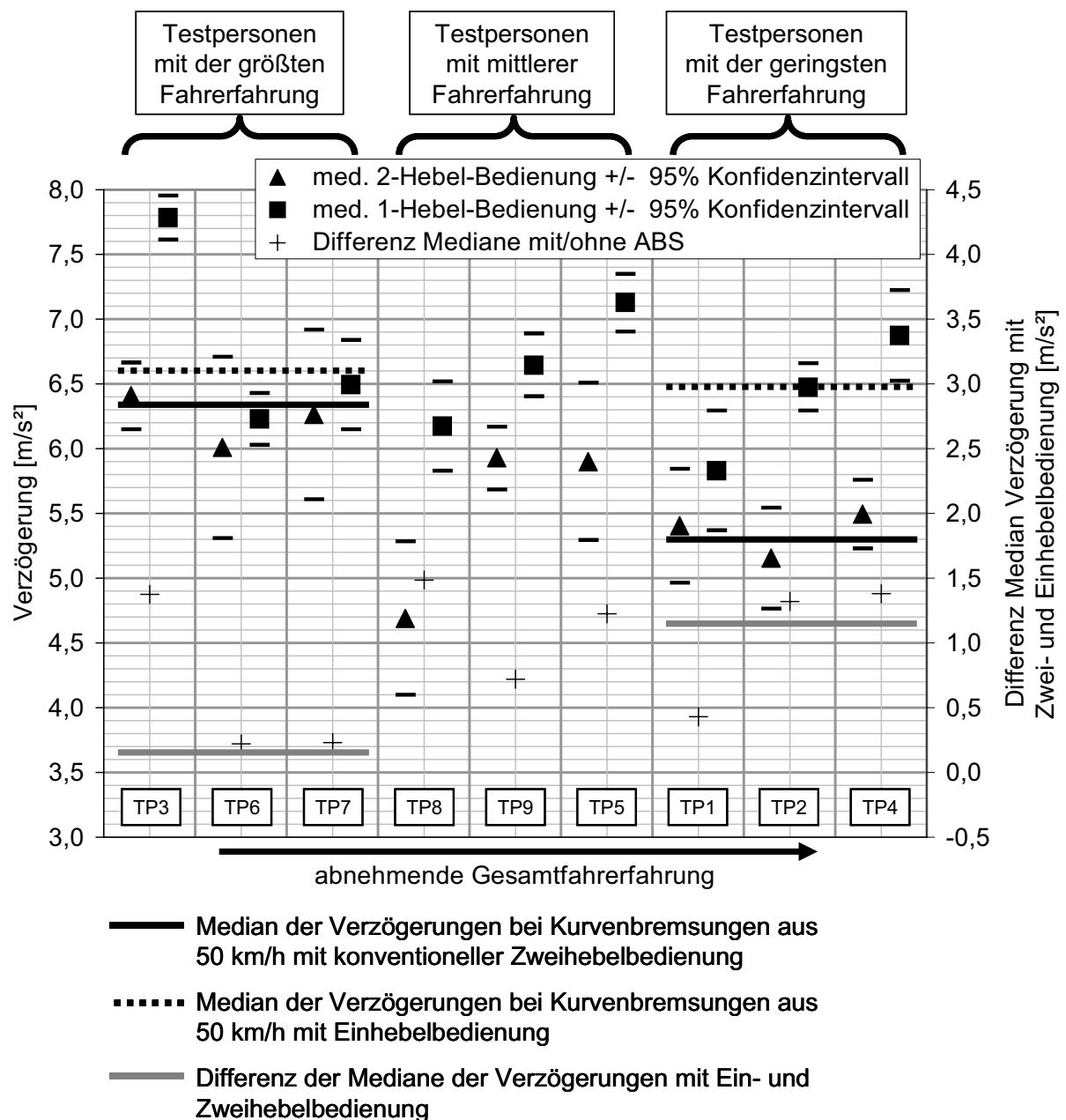


Bild 54: Mediane und 95 % Konfidenzintervalle der mit Zwei- und Einhebelbedienung erzielten Gesamtverzögerungen bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h über den nach Gesamtfahrerfahrung absteigend sortierten Testpersonen

Die Bedienung des blockiergesicherten Kombinationsbremssystems nur mit dem Handbremshebel bietet bei Betrachtung der Bremsleistung keine Nachteile, bei der intraindividuellen Betrachtung der Kurvenbremsung sogar Vorteile gegenüber der konventionellen Bedienung über zwei Betätigungshebel, vgl. Kapitel 4.1.3. Interindividuell ist der Einfluss der Fahrerfahrung tendenziell nicht so groß wie bei den erzielten Gesamtverzögerungen mit und ohne ABS,

vgl. Bild 51. Bis auf drei Testpersonen erzielen alle Testpersonen mit der Betätigungsmöglichkeit nur eines Hebels signifikant höhere Gesamtverzögerungen als mit der Zweihebelbetätigung der blockiergesicherten Kombinationsbremsanlage, s. Bild 54.

Auch wenn die in Bild 54 eingezeichneten Mediane über mehrere Fahrer eine Abhängigkeit der erzielten Gesamtverzögerungen von der Fahrerfahrung der Fahrer suggerieren, so ist zu beachten, dass die erfahrenste Testperson, die auch als einzige Erfahrung mit Motorrad-ABS besitzt, sowohl die höchste Gesamtverzögerung mit dem serienmäßigen, konventionell mit zwei Hebeln bedienten Kombinationsbremssystem mit Blockierverhinderer erreicht, gleichzeitig diesen hohen Wert mit der Einhebelbedienung noch um den – bei Betrachtung des signifikanten Werts – höchsten Betrag unter den Testpersonen steigern kann, während die beiden sehr erfahrenen Testpersonen, die allerdings über keine ABS-Erfahrung verfügen, mit beiden Betätigungsarten gleich hohe Verzögerungen erzielen.

Es kann weiterhin die Hypothese 8 falsifiziert werden, wonach die Einhebelbedienung eines blockiergesicherten Kombinationsbremssystems nur über den Handbremshebel die Testpersonen psychisch genauso beansprucht wie die konventionelle Zweihebelbedienung.

4.3 Schlussfolgerungen

4.3.1 Intraindividuelle Betrachtung

Die Hypothese 3, nach der es bei Bremsungen mit und ohne ABS keinen Unterschied in den Gesamtverzögerungen gibt, kann für die Geradeausbremsung mit 60 km/h nicht falsifiziert werden, jedoch für die Geradeausbremsung aus 90 km/h und die Kurvenbremsung aus 50 km/h. Bei diesen beiden Versuchen ist die Gesamtverzögerung mit ABS signifikant größer als ohne ABS.

Bei Kurvenbremsungen mit blockiergesicherten Bremssystemen aus 50 km/h sind die Gesamtverzögerungen bei Bremsungen mit Blockierverhinderer mit dessen Einsatz signifikant höher als ohne dessen Einsatz.

In ca. 40 % aller Kurvenbremsungen aus 50 km/h mit Bremssystemen mit Blockierverhinderer setzt die ABS-Regelung nicht ein. Dieser Prozentsatz liegt um eine Größenordnung über den entsprechenden Prozentsätzen bei den Geradeausbremsungen mit blockiergesicherten Bremssystemen.

Die psychische und physische Beanspruchung ist entgegen der Hypothese 6 bei der Bremsung mit und ohne Blockierverhinderer nicht gleich groß. Die psychische Beanspruchung ist mit blockiergesicherten Bremssystemen signifikant geringer als ohne Blockierverhinderer. Damit ist Hypothese 6 widerlegt.

Es kann nicht bestätigt werden, dass die mit dem nicht blockiergesicherten Standardbremssystem von den Testpersonen erzielten Bremsleistungen höher sind als die mit dem nicht blockiergesicherten Kombinationsbremssystem erzielten. Damit ist Hypothese 4 widerlegt.

Die psychische Beanspruchung bei der Versuchsdurchführung mit einem Standardbremssystem ohne ABS ist nicht geringer als die bei der Versuchsdurchführung mit einem Kombinationsbremssystem ohne ABS. Weiterhin kann auch nicht bestätigt werden, dass das Merkmal Standard-/Kombinationsbremssystem keinen Einfluss auf die psychische Beanspruchung der Testpersonen hat. Damit ist Hypothese 7 widerlegt.

Die Arbeitshypothese, wonach die Gesamtverzögerungen mit einhebelbedienter, blockiergesicherter Kombinationsbremsanlage niedriger sind als die mit konventionell über zwei Hebel bedienter Kombinationsbremsanlage mit Blockierverhinderer erzielten, kann nicht bestätigt werden. Für die Kurvenbremsung aus 50 km/h kann festgestellt werden, dass die Gesamtverzögerung mit nur einem Bedienhebel größer ist als mit zwei Bedienhebeln. Damit ist Hypothese 5 widerlegt.

Ebenfalls konnte Hypothese 8, nach der die psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei der Versuchsdurchführung mit einem einhebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem genau so hoch sind wie die bei der Versuchsdurchführung mit einem zweihebelbedienten, blockiergesicherten Kombinationsbremssystem, widerlegt werden.

Die in der Einleitungsphase von den Testpersonen erzielten Verzögerungen sind nicht unabhängig vom verwendeten Bremssystem und auch nicht unabhängig von der gestellten Fahraufgabe. Damit sind Hypothese 9 und Hypothese 10 widerlegt.

Über die Hypothesen hinaus kann festgestellt werden, dass der Anteil der mit ABS durchgeführten Bremsungen ohne Einsatz des ABS nicht bei allen Fahraufgaben gleich groß ist. Die von den Testpersonen mit dem Einsatz von ABS erzielten Bremsleistungen sind größer denen ohne den Einsatz des vorhandenen ABS.

4.3.2 Interindividuelle Betrachtung

Es kann nicht bestätigt werden, dass die Gesamtfahrerfahrung über die drei Arten Bremsversuche einen gleich großen Einfluss auf die erzielten Verzögerungen hat. Die psychische Beanspruchung ist bei der Kurvenbremsung größer als bei der Geradeausbremsung. Damit ist Hypothese 1 widerlegt.

Testpersonen mit einer höheren Gesamtfahrerfahrung erzielen auch mit Blockierverhinderer tendenziell höhere Verzögerungen als Testpersonen mit geringerer Fahrerfahrung. Diese Tendenz ist bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h am stärksten ausgeprägt. Damit ist Hypothese 2 widerlegt.

Mit abnehmender Fahrerfahrung steigt tendenziell die psychische Beanspruchung. Je größer die psychische Beanspruchung aus dem Versuchsaufbau, desto größer ist diese Abhängigkeit.

Die Differenz der Bremsleistungen mit und ohne ABS ist nicht unabhängig von den Gesamtfahrerfahrungen der Testpersonen. Bei unerfahrenen Testpersonen ist dieser Unterschied in den Bremsleistungen größer als bei sehr erfahrenen Testpersonen, bei denen teils keine signifikanten Unterschiede in den Bremsleistungen festgestellt werden konnten.

Die Differenz zwischen den psychischen Beanspruchungen der Testpersonen bei den Versuchsdurchführungen mit einhebelbedientem Kombinationsbremssystem mit ABS und mit zweihebelbedientem Kombinationsbremssystem mit ABS ist nicht unabhängig von der Gesamtfahrerfahrung der Testpersonen.

Eine Verbesserung der Bremsleistung durch technische Änderungen am Bremssystem kommt vor allem den weniger erfahrenen Fahrern zugute, und dies in zweierlei Hinsicht: die weniger erfahrenen Fahrer erzielen nicht nur geringere Bremsleistungen als erfahrenere Fahrer, sondern benötigen auch längere Ausweichwege und sind einer höheren Gefahr ausgesetzt, aus der Kurve getragen zu werden¹⁵⁵.

4.4 Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse

Generell kann aus den oben dargestellten Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Falsifikation einer Hypothese umso stärker ausfällt, je größer der Unterschied in der psychischen Beanspruchung der Testpersonen ist. Da die psychische Beanspruchung eine Funktion der psychischen Belastung ist, führt eine Erhöhung der psychischen Belastung auch zu einer erhöhten psychischen Beanspruchung. Eine Änderung der psychischen Beanspruchung kann zu anderen Ergebnissen führen.

Die Anzahl der Testpersonen ist sehr klein gegenüber der Vergleichsgruppe der jungen, männlichen, sportlich orientierten und technisch versierten Motorradfahrer. Mit einer größeren Vergleichsgruppe könnte die Signifikanz sich abzeichnender Trends nachgewiesen werden.

4.4.1 Versuchsaufbau

Bremsversuche auf abgesperrter Versuchsstrecke sind gegenüber kritischen Vollbremssituationen im öffentlichen Straßenverkehr aufgrund ihrer Vorhersehbarkeit psychisch weniger belastend. Es gilt auch hier, dass die dargestellten Ergebnisse in ihrer Bedeutung in stärkerem Maße auch für kritische Situationen im Straßenverkehr gültig sind¹⁵⁶. Wie bereits in Kapitel 2.3 dargelegt, sind die den Vergleich von Kombinationsbremse und Standardbremse jeweils ohne ABS betreffenden Hypothesen im öffentlichen Straßenverkehr bezüglich eines nicht

¹⁵⁵ Appel et al. 1986: Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer

¹⁵⁶ Präckel 1996: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS, S. 65

vorhandenen Unterschieds der physischen Beanspruchungsgrößen signifikanter falsifizierbar und auf die Fehlbedienung der Bremse in Form der Nichthandlung ausdehnbar^{157,158}.

Die gewählten Ausgangsgeschwindigkeiten decken den Erfahrungshorizont auch der weniger erfahrenen Motorradfahrer im Straßenverkehr ab und bilden die üblicherweise auf Landstraßen – auf denen die Überzahl der Motorradunfälle stattfindet¹⁵⁹ – gefahrenen Geschwindigkeiten ab. Bei höheren Geschwindigkeiten ist tendenziell die psychische Beanspruchung der Fahrer höher. Bei der aus der Einfahrtgeschwindigkeit und dem vorgegebenen Kurvenradius resultierenden Querschleunigung als Ausgangssituation für die Kurvenbremsung ist die Querschleunigung derart gewählt, dass der daraus abgeleitete Rollwinkel des Motorrads Teilmenge des natürlichen Mesokosmos des Menschen ist. Größere Rollwinkel führen zu einer erhöhten psychischen Belastung. Mit einer erhöhten psychischen Beanspruchung der Fahrer sind vorhandene Unterschiede in den bewerteten Einflussgrößen signifikanter falsifizierbar.

Die vollständig mit Wasser benetzte Fahrbahnoberfläche soll einen Teil der bei Versuchen auf abgesperrtem Versuchsgelände im Gegensatz zu gleich gelagerten Situationen im öffentlichen Straßenverkehr fehlenden psychischen Belastung der Testpersonen kompensieren. Hingegen kann die Griffigkeit der Fahrbahn von den Versuchspersonen im Lauf der Versuche immer besser abgeschätzt werden, während im öffentlichen Straßenverkehr der Reibbeiwert schwanken kann und – wenn überhaupt – im Bedarfsfall nur optisch abgeschätzt werden kann mit möglicherweise fatalen Fehleinschätzungen bei der Durchführung der Bremsung¹⁶⁰. In der Literatur wird ein Zusammenhang zwischen dem Straßenzustand auf der einen und Unfallhäufigkeit und -schwere auf der anderen Seite nicht bestätigt^{161,162}, allerdings sind die absoluten oder anteiligen Fahrleistungen von Motorradfahrern in Abhängigkeit vom Straßenzustand nicht bekannt.

4.4.2 Versuchsfahrzeug

Die Fahrwerkskonfiguration des Versuchsfahrzeugs BMW R1150RT weicht von der Standard-Fahrwerkskonfiguration der überwiegenden Mehrheit der Motorradpopulation ab. Durch den fast vollständigen kinematischen Bremsnickausgleich kann der Aufbau der eingeschwungenen Bremskraftverteilung sehr viel schneller stattfinden als bei Fahrzeugen mit der Stan-

¹⁵⁷ Spörner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 175

¹⁵⁸ Spiegel 2004: Analyse eines exemplarischen schweren Alleinunfalls, S. 127

¹⁵⁹ Assing 2002: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern

¹⁶⁰ Spörner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 176

¹⁶¹ Assing 2002: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern

¹⁶² Spörner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern, S. 166

standardfahrwerkskonfiguration Telegabel vorne und Schwinge hinten. Die Anpassung des Fahrers an das vergleichsweise geringe Bremsnicken ist in der Lernkurve enthalten. Eine dynamische Vorderradüberbremsung ist mit dem verwendeten Versuchsfahrzeug im Gegensatz zu den meisten anderen Motorrädern nicht möglich und somit dem Fahrer eine Versagensmöglichkeit beim Bremsen mit nicht blockiergesicherten Bremssystemen genommen. Die idealen Bremskraftverteilungen mit Standardfahrwerk und dem Fahrwerk des Versuchsmotorrads in der Einleitungsphase einer Bremsung¹⁶³ führen zu der Aussage, dass Vergleiche – das Vorhandensein eines ABS betreffend – mit Motorrädern mit Standardfahrwerkskonfiguration vor allem in der prinzipbedingt mit Standardfahrwerk längeren Einleitungsphase einer Bremsung größere Unterschiede in den erzielten Bremsleistungen ergeben; es kann davon ausgegangen werden, dass mit einem Motorrad mit Standardfahrwerk ohne Blockierverhinderer die Bremsleistung geringer ist als bei einem Motorrad mit der in dieser Arbeit verwendeten Fahrwerkskonfiguration.

Nicht Teil der Untersuchung waren Bremssysteme, bei denen nur ein Rad blockiergesichert ist. Auf diese aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus entwickelte Lösung können die vorliegenden Ergebnisse aufgrund der synchronen Bremsenbetätigung bei Blockade eines Rads¹⁶⁴ nicht übertragen werden.

Die Bezeichnung „Kombinationsbremssystem“ wird für verschiedene Arten der Verknüpfung zwischen Bremsbedienelementen und Radbremsen verwendet, vgl. Kapitel 1.2.2. Die in dieser Arbeit untersuchte gleichberechtigte Druckverteilung der Bedienelemente auf die Radbremsen ist nicht übertragbar auf Kombinationsbremssysteme, bei denen eine Betätigung des Fußbremshebels auf den Großteil der bremswirksamen Reibflächen wirkt und der Handbremshebel wesentlich weniger Anteil an der Gesamtbremswirkung hat.

4.4.3 Testpersonen

Die Testpersonen entstammen nur einer Teilmenge der Motorradfahrerpopulation. Allerdings ist diese Teilmenge der erfahrenen, sportlichen Motorradfahrer der Teil aus der Menge der Motorradfahrer, der, verglichen mit anderen Motorradfahrern, auch unter erhöhter psychischer Belastung höhere Bremsverzögerungen erzielen kann als andere Motorradfahrer. So werden sich signifikante Unterschiede in den Bremsleistungen der Testpersonen mit großer Wahrscheinlichkeit auch für andere Motorradfahrer nachweisen lassen. Es konnte gezeigt werden, dass beispielsweise die Bremsleistungen von Testpersonen mit eher geringerer Gesamtfahrerfahrung eine größere Abhängigkeit von der psychischen Belastung des Fahrers aufzeigen als es bei erfahrenen Testpersonen der Fall ist. Weiterhin wird schlussfolgernd aus der Literatur erwartet, dass bei Testpersonen mit geringerer Fahrerfahrung die Unterschiede

¹⁶³ Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraftradbremssysteme, S. 10f

¹⁶⁴ Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung, S. 130

zwischen den Bremssystemen stärker identifizierbar sind¹⁶⁵. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass andere Gruppen von Motorradfahrern durch das Vorhandensein einer Eingriffselektronik psychisch derart stark beansprucht werden, dass die Bremsleistungen bei Bremssystemen mit einem höheren Entwicklungsgrad ohne spezifischen Lernprozess geringer sind als die der Standardbremse.

4.4.4 Fazit

Abgesehen von der optisch nassen Fahrbahn sind alle Versuchsparameter bezüglich der Auswahl der Versuchsgeschwindigkeiten, des Versuchsfahrzeugs, der Testpersonen und der Auswertung auf den Bestfall eingestellt. Wenn unter den während der vorliegenden Versuche herrschenden Bedingungen Unterschiede nachweisbar sind, dann werden diese Unterschiede unter näher an die Realität des Straßenverkehrs reichenden Bedingungen stärker abgrenzbar sein.

¹⁶⁵ Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung, S. 117

5 Ausblick

Basierend auf den Versuchsergebnissen kann die Empfehlung ausgesprochen werden, ABS bei Motorrädern nicht nur zur bereits bekannten Verringerung der Unfallhäufigkeit und der Unfallschwere flächendeckend einzuführen, sondern auch zur Entlastung des Fahrers. Die Untersuchungsergebnisse zeigen nicht nur den erwarteten objektiven Vorteil einer höheren Bremsleistung eines mit ABS ausgestatteten Motorrads, sondern zeigen auch, dass mit dieser Technik der Fahrer nicht zusätzlich belastet wird. Im Gegenteil finden sich sogar partielle Absenkungen der psychischen und der physischen Beanspruchung. Weiterhin lassen die Versuchsergebnisse den Schluss zu, dass bei einer blockiergesicherten, mit einer an die ideale Bremskraftverteilung angenäherten Bremskraftverteilung ausgestatteten Kombinationsbremse bezüglich der Bremsleistung und der Belastung und Beanspruchung der Fahrer kein Nachteil der Handhebelbedienung gegenüber der Zweihebelbedienung besteht. Daraus lässt sich ableiten, dass parallel zur Gesetzgebung bei anderen Kraftfahrzeugen die Forderung nach zwei baulich getrennten Bedieneinrichtungen für die Betriebsbremse aus arbeitswissenschaftlicher Sicht auch beim Motorrad nicht aufrechterhalten werden sollte.

Bisherige Untersuchungen konnten mangels geeigneter Testpersonen bislang nur die Änderung des Bremsverhaltens von an Standardbremssysteme gewöhnten Motorradfahrern bei der Bremsung mit blockiergesicherten Bremssystemen oder Kombinationsbremssystemen verglichen mit den ihnen vertrauten Bremssystemen beobachten. Aus der Sicht der Unfallforschung ist es notwendig, auch vorzugsweise wenig erfahrene Testpersonen mit ausschließlich ABS-Erfahrung hinsichtlich der Bremsleistung mit nicht blockiergesicherten Bremssystemen unter erhöhter psychischer Belastung zu untersuchen. Es muss ausgeschlossen werden können, dass es bei diesen Fahrern unter erhöhter psychischer Beanspruchung in Bremssituationen ohne Blockierverhinderer zu signifikant häufigeren Vorderradblockaden kommt als bei der Vergleichsgruppe ohne ABS-Erfahrung. Solche Testpersonen sind inzwischen schwerpunktmäßig in der Gruppe der Führerschein-Direkteinsteiger zu vermuten. Ähnliches gilt für Kombinationsbremssysteme.

Es gilt zu überprüfen, inwieweit die vorliegenden Versuchsergebnisse bezüglich der psychischen Beanspruchung des Fahrers durch das Vorhandensein eines bestimmten Bremssystems nicht nur bei der konkreten Bremssituation, sondern generell im öffentlichen Straßenverkehr zum Tragen kommen. Ein Vorschlag für eine dementsprechende Versuchsanordnung wäre die Installation einer Nebenbeschäftigung des Fahrers während der Erfüllung einer Fahraufgabe im öffentlichen Straßenverkehr. Der Erfüllungsgrad der Nebenbeschäftigung kann als Maß für die Beanspruchung genommen werden. Sollte die psychische Beanspruchung des Motorradfahrers bei der Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr beispielsweise durch das Vorhandensein eines Blockierverhinderers generell sinken, so kann der Motorradfahrer andere Ge-

fahrensituationen besser vermeiden oder bewältigen. Vigilanz ist beim Motorradfahren im Allgemeinen nicht zu befürchten.

Eine große Herausforderung für die Motorradforschung ist weiterhin die Darstellung einer Schrecksituation oder einer Situation mit – möglichst validiert – äquivalenter psychischer Belastung ohne tatsächliche Gefährdung der Testperson. Ein Denkansatz könnte sein, Testpersonen ein abgeschaltetes ABS vorzuspiegeln. Ohne eine derartige Konditionierung der Testperson werden in Versuchssituationen gewonnene Daten bezüglich ihrer Übertragbarkeit auf das reale Verkehrsgeschehen immer erheblichen Einschränkungen unterworfen sein.

Ein Argument für blockiergesicherte Kombinationsbremssysteme gegenüber ebenfalls blockiergesicherten Standardbremssystemen ist die Vermutung, dass so eine Fehlbedienung der Bremse weniger Auswirkungen auf den Bremsweg habe. Eine Anwendung der vorab beschriebenen Darstellung einer Schrecksituation könnte klären, ob die beobachtete Fehlbedienung der Bremse mit der Bedingung verknüpft ist, dass diese nicht blockiergesichert ist, da ein vorhandener Blockierverhinderer dem Fahrer die Angst vor einer möglichen Vorderradblockade nimmt, und dieser deshalb die Vorderradbremse auch unter hoher psychischer Belastung einsetzen wird.

Über ABS und Kombinationsbremsanlage hinaus denkbare Adaptationen von Pkw-Fahrerassistenzsystemen an das Motorrad und seinen Fahrer bedürfen nicht nur der weiteren fahrzeugtechnischen Untersuchung der Motorradfahrtdynamik, sondern vor allem auch der arbeitswissenschaftlichen Berücksichtigung der „oberen Hälfte des Motorrads“¹⁶⁶, des Fahrers.

¹⁶⁶ Spiegel 1998: Die obere Hälfte des Motorrads

6 Anhang

6.1 Einfahrtgeschwindigkeiten

Es wurde überprüft, ob die Einfahrtgeschwindigkeiten der Testpersonen von der Art des Bremssystems abhängen. Sollte dies nicht der Fall sein, so kann ein Vergleich der Bremsleistungen ohne Rücksichtnahme auf die Einfahrtgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Bild 55 zeigt die tatsächlichen Einfahrtgeschwindigkeiten der Testpersonen bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h. Zwischen den Bremssystemen ist hinsichtlich der tatsächlichen Einfahrtgeschwindigkeiten kein Unterschied feststellbar. Die generell gegenüber der Vorgabe niedrigere Einfahrtgeschwindigkeit erklärt sich aus der oben dargelegten Vorgehensweise bei der Erkennung eines Bremsvorgangs, die zulässt, dass bereits vor der eigentlichen Erfassung des Bremsvorgangs über eine Abbremsung Geschwindigkeit abgebaut werden kann.

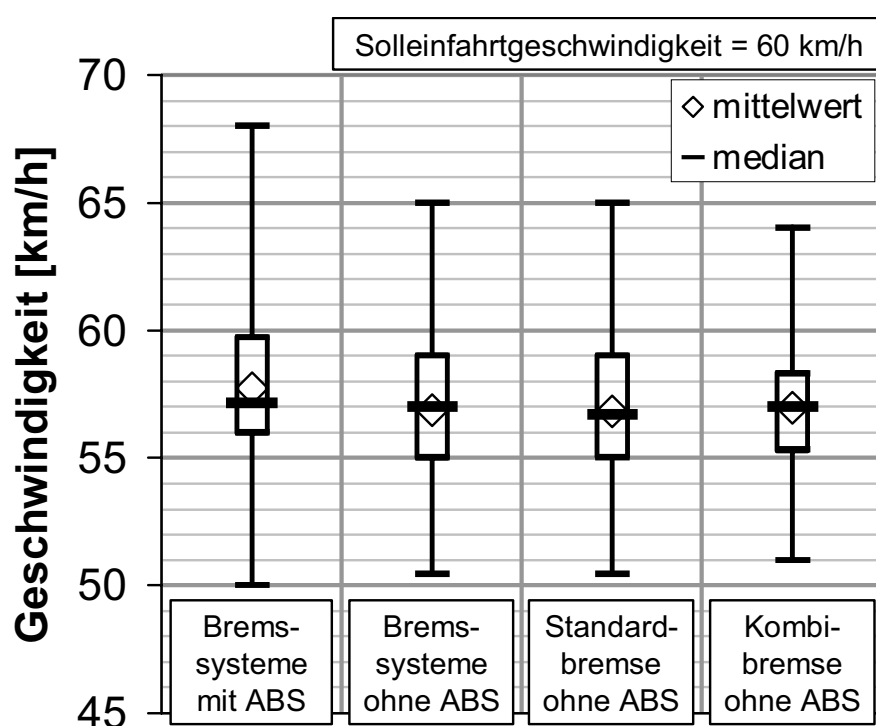


Bild 55: Tatsächliche Einfahrtgeschwindigkeiten der Testpersonen bei der Geradeausbremsung aus 60 km/h: Boxplot mit jeweils Minimum, 1. Quartil, Median, Mittelwert, 3. Quartil und Maximum

Auch die Analyse der Geradeausbremsung aus 90 km/h lässt den Schluss nicht zu, dass die Einfahrtgeschwindigkeiten bei verschiedenen Bremssystemen unterschiedlich sein könnten, s. Bild 56.

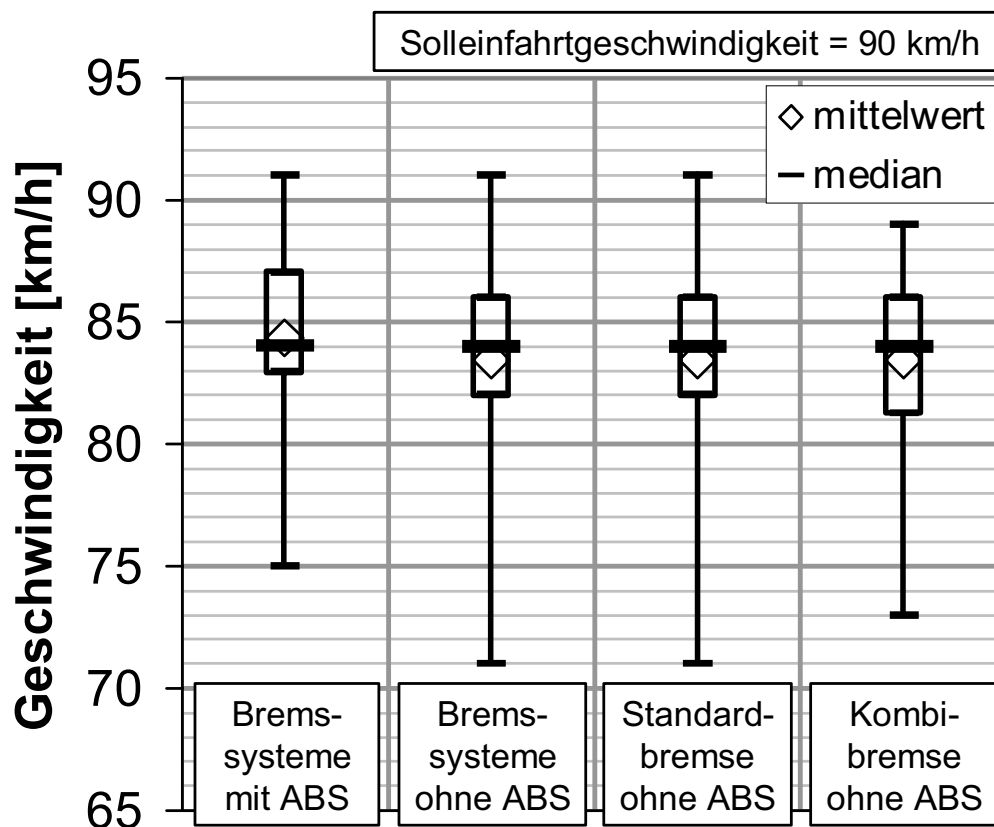


Bild 56: Tatsächliche Einfahrtgeschwindigkeiten der Testpersonen bei der Geradeausbremsung aus 90 km/h: Boxplot mit jeweils Minimum, 1. Quartil, Median, Mittelwert, 3. Quartil und Maximum

Bei der Betrachtung der Einfahrtgeschwindigkeiten bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h lässt sich ebenfalls kein belastbarer Unterschied zwischen den Bremssystemen herauslesen, s. Bild 57. Die Differenzen zwischen den Medianen liegen innerhalb der Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls und betragen weniger als 1 km/h bei einer Messgenauigkeit von ca. 0,8 % vom Messwert.

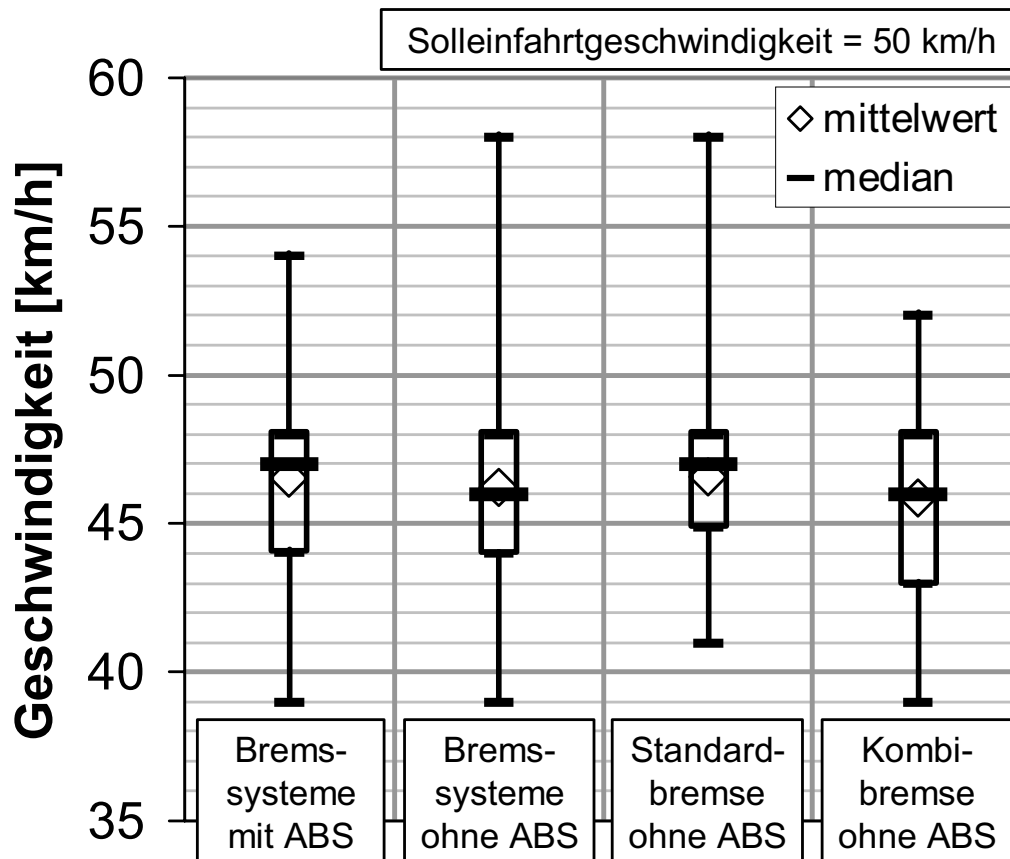


Bild 57: Tatsächliche Einfahrtgeschwindigkeiten der Testpersonen bei der Kurvenbremsung aus 50 km/h: Boxplot mit jeweils Minimum, 1. Quartil, Median, Mittelwert, 3. Quartil und Maximum

Es wird daher davon ausgegangen, dass aus der Einfahrtgeschwindigkeit ein Artefakteinfluss auf die Verzögerungen in den Einleitungs- und Vollbremsphasen der betrachteten Merkmale von Bremssystemen auszuschließen ist.

6.2 Bilder Messtechnik

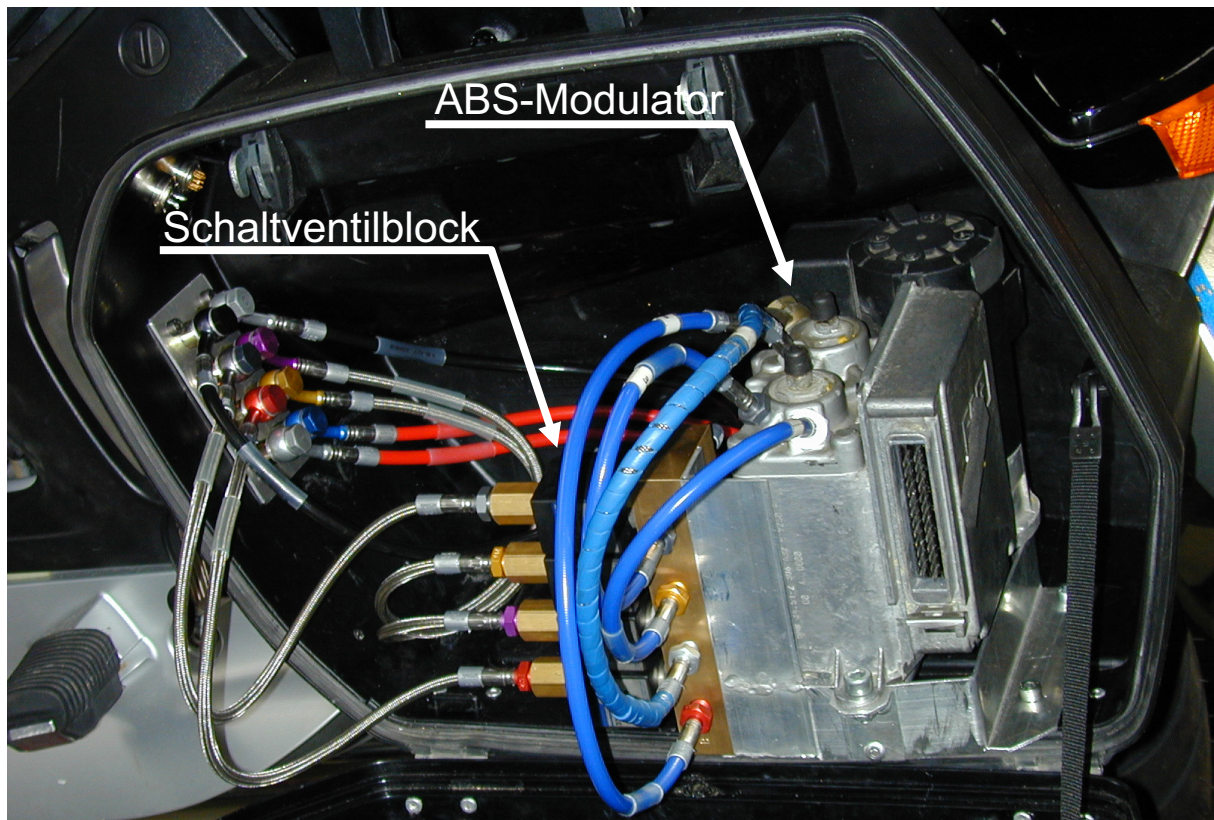


Bild 58: Hydraulische Ventilschaltseinheit mit Druckmodulator für die blockiergesicherte Standardbremse im linken Fahrzeugkoffer

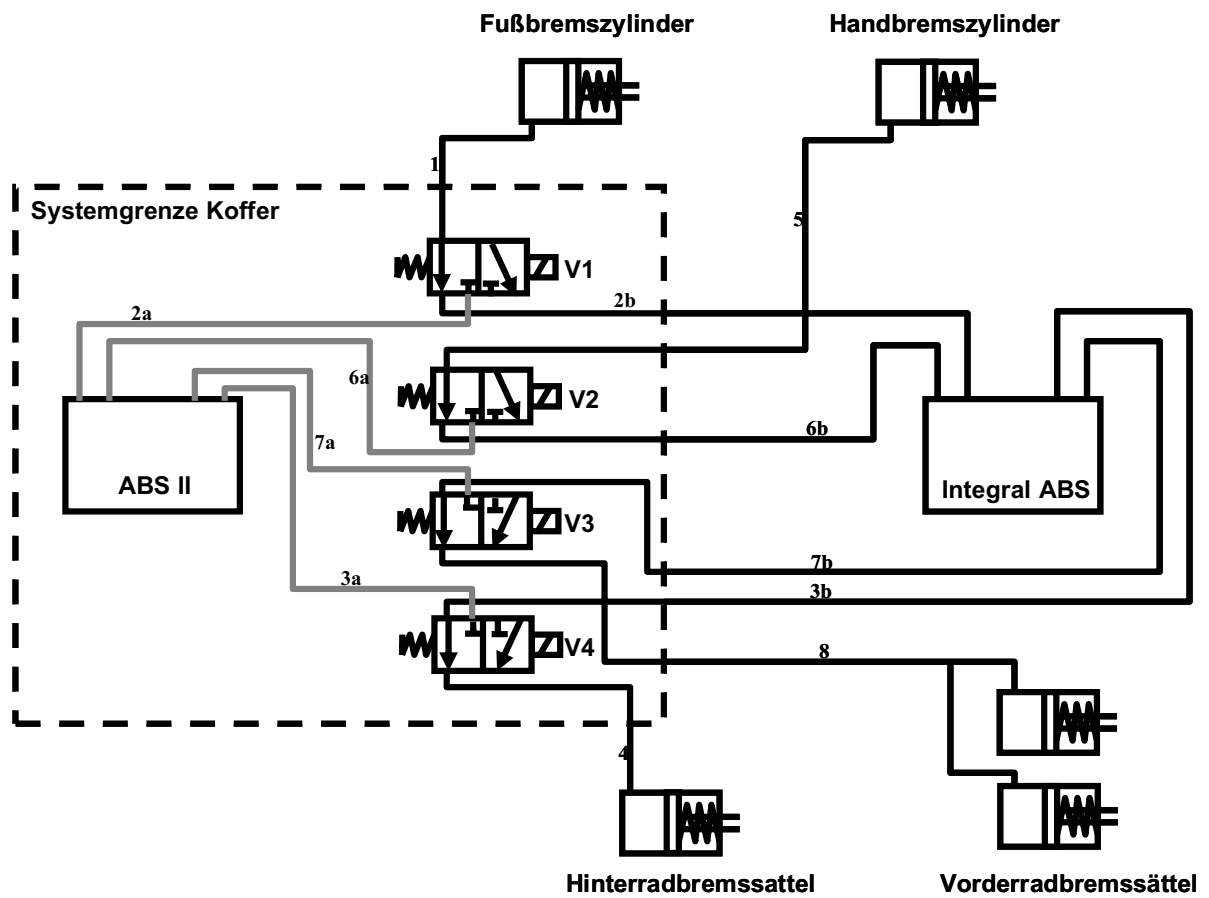


Bild 59: Hydraulisches Schaltbild der im Versuchsmotorrad verbauten Bremssysteme mit zum Serienmotorrad identischem, stromlos sicherem Zustand



Bild 60: Cockpit des Versuchsmotorrads mit Bremssystemumschaltung (1) und Informationsdisplay für den Versuchsfahrer (2)

6.3 Toleranzberechnung Fehlerband ideale Bremskraftverteilung über eine Schwerpunktbestimmung am Versuchsmotorrad

6.3.1 Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der BMW R1150RT wurde mittels Radlastwaagen in seinen x- und z-Koordinaten bestimmt. Dazu wurden die Radlasten des Fahrzeugs in der Ebene und mit erhöht aufgebocktem Vorderrad vermessen. Dies geschah mit und ohne Fahrer ($m = 86,5 \text{ kg}$).

Eine Fehlerbetrachtung wurde durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt:

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwerpunktbestimmung

Maß	Kurz- zeichen	Nennmaß	Plus- toleranz	Minus- toleranz
Horizontaler Abstand zwischen Schwerpunkt und vorderem Radaufstandspunkt	l_v	749,4 mm	2,9	2,9
Horizontaler Abstand zwischen Schwerpunkt und hinterem Radaufstandspunkt	l_h	729,5 mm	2,8	2,8
Horizontaler Abstand zwischen Schwerpunkt und vorderem Radaufstandspunkt, mit Fahrer	l_{v_Fahrer}	807,7 mm	7,4	7,4
Horizontaler Abstand zwischen Schwerpunkt und hinterem Radaufstandspunkt, mit Fahrer	l_{h_Fahrer}	671,2 mm	7,1	7,1
Schwerpunkthöhe, mit Feder/Dämpfer-Ersatz	h_s	602,5 mm	9,0	9,0
Schwerpunkthöhe, mit Fahrer, mit Feder/Dämpfer-Ersatz	h_{s_Fahrer}	711,9 mm	28,6	28,6

6.3.2 Ausführliche Beschreibung

Die Ermittlung des Schwerpunkts wurde nach dem Skript Motorräder¹ vorgenommen. Die verwendeten Radlastwaagen besitzen eine Auflösung von 0,5 kg und wurden im Vormonat kalibriert. Für die Zwecke der Schwerpunktbestimmung ist es ergebnisbestimmend, dass beide Radlastwaagen für die gleiche Masse den gleichen Wert anzeigen. Daher wurden vor den Versuchen Reproduzierbarkeitsmessungen durchgeführt. Die Gewichtskraft verschiedener Massen wurde jeweils mit Radlastwaage 1 und Radlastwaage 2 gemessen und die Abweichung protokolliert. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Gegenkontrolle der Radlastwaagen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anzeigegenauigkeit im bezeichneten Anwendungsfall der Genauigkeitsbegrenzende Faktor ist. Als Fehler in der Messgenauigkeit der Radlastwaagen ist daher $\pm 0,25$ kg anzunehmen.

Tabelle 4: Reproduzierbarkeit der Messungen an den verwendeten Radlastwaagen

Masse	Anzeige Radlastwaage 1	Anzeige Radlastwaage 2	Abweichungen zwischen den Radlastwaagen
Personen 1 und 2	155 kg	155 kg	0 kg
Personen 2 und 3	163,5 kg	163,5 kg	0 kg
Personen 3 und 1	165 kg	165 kg	0 kg
Vorderrad R1150RT	147 kg	147 kg	0 kg
Hinterrad R1150RT	150,5 kg	150,5 kg	0 kg
Versuchsmotorrad	298 kg	298 kg	0 kg
Versuchsmotorrad mit Fahrer	384,5 kg	384,5 kg	0 kg

Die statischen Radhalbmesser wurden ebenso wie die Höhe des Bocks, auf den das Vorderrad in der zweiten Stufe der Vermessung gestellt wurde, mit einem Messstab ermittelt. Die Summe aus Mess- und Ablesegenauigkeit beträgt jeweils 2 mm. Der Radstand wurde den Hersteller-Konstruktionsdaten entnommen. Die Fertigungsgenauigkeit wurde mit 2 mm angenommen.

Das Versuchsmotorrad wurde ohne Umsturzvorrichtung vermessen. Der Füllstand des Tanks war annähernd voll.

Bei Messungen mit Fahrer hat dieser mit seiner Sitzhaltung und -position einen Einfluss auf das Ergebnis. Es konnte eine Reproduzierbarkeit der Radlast von 1,5 kg ermittelt werden.

¹ Breuer 2001: Motorradskript, S. 14ff

Zur Gewährleistung der Genauigkeit der Messungen muss der Schwerpunkt in y-Richtung exakt über der Radaufstandslinie liegen. Dies wurde erreicht, indem das Motorrad mit einer leichten Querführung durch den neben dem Motorrad stehenden Bediener austariert wurde. In einer Phase labilen Gleichgewichts las ein zweiter Bediener nach Aufforderung die von den Radlastwaagen angezeigten Werte ab. Dies wurde mehrfach wiederholt, wobei sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse darstellte.

Tabelle 5 zeigt die Messergebnisse mit Fehlertoleranz im Einzelnen:

Tabelle 5: Messdaten und Messfehler

Parameter	Messergebnis	Fehlertoleranz
Statischer Reifenhalbmesser vorne	287 mm	± 2 mm
Statischer Reifenhalbmesser hinten	302 mm	± 2 mm
Radstand	1.478,9 mm	± 2 mm
Aufbockhöhe Vorderrad	299 mm	± 2 mm
Radlast vorne	147 kg	$\pm 0,25$ kg
Radlast hinten	151 kg	$\pm 0,25$ kg
Masse Motorrad	298 kg	$\pm 0,25$ kg
Masse Motorrad und Fahrer	384,5 kg	$\pm 0,25$ kg
Masse Bock	29 kg	$\pm 0,25$ kg
Radlast Motorrad mit Fahrer vorne	174,5 kg	± 2 kg
Radlast Motorrad mit Fahrer hinten	210 kg	± 2 kg
Radlast vorne inkl. Bock, Vorderrad aufgebockt	163,5 kg	$\pm 0,25$ kg
Radlast hinten, Vorderrad aufgebockt	163,5 kg	$\pm 0,25$ kg
Radlast Motorrad mit Fahrer vorne inkl. Bock, Vorderrad aufgebockt	181,5 kg	± 2 kg
Radlast Motorrad mit Fahrer hinten, Vorderrad aufgebockt	232,5 kg	± 2 kg

Aus den Toleranzen dieser Rohdaten ergeben sich Toleranzen in den berechneten Daten. Dabei wird bei bis zu drei einfließenden Größen die Gesamt toleranz arithmetisch berechnet, ab vier einfließenden Toleranzgrößen² wird sie statistisch berechnet.

² Mannewitz 2004: Komplexe Toleranzanalysen

Tabelle 6 zeigt die Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Rohdaten und den damit verbundenen Fehlertoleranzen.

Tabelle 6: Aus Messdaten ermittelte Ergebnisse und Fehlertoleranzen

Ergebnisgröße	Einfließende Rohdaten	Ergebniswert	Toleranz \pm
l_v	Radstand, Radlast hinten, Fahrzeugmasse	749,38 mm	2,88 mm
l_h	Radstand, Radlast vorne, Fahrzeugmasse	729,52 mm	2,84 mm
l_{v_Fahrer}	Radstand, Radlast hinten, Fahrzeugmasse mit Fahrer Masse	807,72 mm	7,39 mm
l_{h_Fahrer}	Radstand, Radlast vorne, Fahrzeugmasse mit Fahrer Masse	671,18 mm	7,11 mm
h_S	Fahrzeugmasse, Radlast vorne, Radstand, Bockhöhe, Radhalbmesser hinten, Masse Bock	602,50 mm	9,02 mm
h_{S_Fahrer}	Fahrzeugmasse, Radlast vorne, Radstand, Bockhöhe, Radhalbmesser hinten, Masse Bock	711,89 mm	28,57 mm

Aus den ermittelten Toleranzen ergeben sich unter anderem im Bremskraftverteilungsdiagramm Toleranzbänder.

7 Literaturverzeichnis

Appel, H., D. Otte und J. Wüstemann

[Appel et al. 1986: Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer]:
Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer in der BRD – Sicherheitsaspekte. In: Der Motorradunfall – Beschreibung, Analyse, Prävention. Reihe Forschungshefte Zweiradsicherheit des Instituts für Zweiradsicherheit, Heft Nr. 3, S. 47-92, Bochum 1986

Aschenbrenner, K. M., B. Biehl und G. W. Wurm

[Aschenbrenner et al. 1992: Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems]:
Mehr Verkehrssicherheit durch bessere Technik? Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems (ABS). Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 246, Bergisch Gladbach 1992

Assing, K.

[Assing 2000: Schwerpunkte der Unfälle von Motorradfahrern]:
Schwerpunkte der Unfälle von Motorradfahrern. In: Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonferenz 2000, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2000, S. 41-53

Assing, K.

[Assing 2002: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern]:
Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Mensch und Sicherheit, Heft M 137, Bergisch Gladbach 2002

Bielaczek, C.

[Bielaczek 1998: Aktive Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit]:
Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr. Diss. TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 357, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998

Bleymüller, J. und G. Gehlert

[Bleymüller et al. 1999: Statistische Formeln und Tabellen]:
Statistische Formeln, Tabellen und Programme. 9. Auflage, Verlag Vahlen, München 1999

- Bleymüller, J., G. Gehlert und H. Gülicher
[Bleymüller et al. 2002: Statistik]:
Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. 13. Auflage, Verlag
Vahlen, München 2002
- BMW AG Presse [BMW 2000: Motorrad Programm 2001]:
BMW Motorrad Programm 2001. Presseunterlagen, unveröf-
fentlicht, München 2000
- BMW AG Sparte Motorrad [BMW Motorrad 1995: BMW R1100RT]:
Die neue BMW R1100RT – Technik im Detail. BMW-Kunden-
dienst Schulungsunterlagen, unveröffentlicht, München 1995
- BMW Motorrad GmbH&Co [BMW Motorrad 1993: BMW R1100RS]:
Die neue BMW R1100RS – Technik im Detail. BMW-Kunden-
dienst Schulungsunterlagen, unveröffentlicht, München 1993
- Bokranz, R. und K. Landau [Bokranz et al. 1991: Einführung in die Arbeitswissenschaft]:
Einführung in die Arbeitswissenschaft. Verlag Eugen Ulmer,
Stuttgart 1991
- Bönsch, H. W. [Bönsch 1985: Fortschrittliche Motorradtechnik]:
Fortschrittliche Motorradtechnik. Motor Buch Verlag,
1. Auflage, Stuttgart 1985
- Braunsperger, M., S. Beulich und H.-A. Wagner
[Braunsperger et al. 2001: Das neue Integral ABS]:
Das neue Integral ABS von BMW Motorrad. In: Zeitschrift
ATZ, 103. Jahrgang (2001), Heft Nr. 3
- Braunsperger, M., S. Beulich, H.-A. Wagner und G. Heyl
[Braunsperger et al. 2001: Integral ABS im Praxistest]:
Das neue Integral ABS von BMW Motorrad im Praxistest. In:
Breuer, B. (Hrsg.): Tagungsband zum XXI. Internationalen
 μ -Symposium, Bremsen-Fachtagung 19./20. Oktober 2001, Bad
Neuenahr, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 474, Düssel-
dorf 2001, S. 1-19
- Breuer, B. [Breuer 2001: Motorradskript]:
Skriptum zur Vorlesung Motorräder. TU Darmstadt, Fachgebiet
Fahrzeugtechnik, Darmstadt 2001, unveröffentlicht
- Breuer, B. und K. H. Bill [Breuer et al. 2004: Bremsenhandbuch]:
Bremsenhandbuch. 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden
2003

- Breuer, J. [Breuer 1996: Arbeitssystem Kraftfahrzeugführen]:
Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des
Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen. Diss. TH Darmstadt, Fort-
schritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 271, VDI-Verlag, Düssel-
dorf 1996
- Brickenkamp, R. [Brickenkamp 1975: d2-Test]:
Test d2: Aufmerksamkeits-Belastungstest; Handanweisung;
Durchführung, Auswertung, Interpretation, 5. erw. Aufl., Verlag
für Psychologie, Göttingen 1975
- Bubb, H. [Bubb 1992: Menschliche Zuverlässigkeit]:
Menschliche Zuverlässigkeit. 1. Auflage, Ecomed-Verlag,
Landsberg 1992
- Buckley, M. und C. Rees [Buckley et al. 2000: Auto]:
Auto. Lechner Eurobooks Verlag, Limassol 2000
- Burckhardt, M. [Burckhardt 1985: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen]:
Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen. In: Fahrzeugtechni-
sche Schriftenreihe, Hrsg. Mitschke und Frederich. Verlag TÜV
Rheinland, Köln 1985
- Casper, C. und M. Vogt [Casper et al. 1998: Modern Motorcycle Tyres]:
Development of Modern Motorcycle Tyres. In: Beiblatt zu Pro-
ceedings of the International Conference Power Two Wheels,
Pisa 1998
- Cogotti, A. [Cogotti 1998: Experimental wind tunnel techniques for two-
wheel vehicles]:
Evolution of experimental wind tunnel techniques for two-wheel
vehicles. In: Proceedings of the International Conference Power
Two Wheels, Pisa 1998, S. 145-159
- Colombo, M. [Colombo 1989: Moto Guzzi]:
Moto Guzzi. Motor Buch Verlag, Stuttgart 1989
- Compagne, J. [Compagne 2004: First Results of a European Motorcycle In
Depth Accident Study]:
MAIDS – The First Results of a European Motorcycle In-Depth
Accident Study. In: Tagungsband der 5. Internationalen Motor-
radkonferenz 2004, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 11
des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2004
- Continental Teves AG &Co. oHG [ContiTeves 2004: 20 Jahre ABS]:
Pressemappe: 20 Jahre ABS. Frankfurt, 2004

- DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Verband der Automobilindustrie e.V.
[FAKRA-Handbuch Kraftfahrzeugbau]:
Loseblattwerk FAKRA-Handbuch. Normen für den Kraftfahrzeugbau, Band 4: Bremsausrüstung. Beuth Verlag, Berlin 1994
- Donges, E.
[Donges 1977: Lenkverhalten von Kraftfahrern]:
Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt. Darmstadt: Dissertation an der TH Darmstadt 1977
- Echterhoff, W.
[Echterhoff 1992: Erfahrungsbildung von Verkehrsteilnehmern]:
Erfahrungsbildung von Verkehrsteilnehmern. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 254, Bergisch Gladbach 1992
- Ecker, H., A. Fischer, K. Vavryn und M. Winkelbauer
[Ecker et al. 2000: Bremsbeherrschung von Motorradfahrern]:
Bremsbeherrschung von Motorradfahrern – Ergebnisse aus einem Großversuch. In: Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonferenz 2000, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2000
- Ervin, R. D.
[Ervin 1977: Motorcycle Braking Performance]:
Motorcycle Braking Performance, Final Report. HSRI, February 1977, 3 V. Report No. UM-HSRI-76-30
- Flaccus, Q. H.
[Horaz]
De arte poetica, 361.
Nach: <http://www.gavagai.de/zitat/antike/hhc04.htm>, Stand 16.11.2005
- FTE Automotive
[FTE Automotive: CORA]:
Bremsystem CORA. Prospekt der DANA FTE Automotive, unveröffentlicht, 2000
- Funke, J.
[Funke 2000: Dynamische Vorderradüberbremsung bei Motorrädern]:
Dynamische Vorderradüberbremsung bei Motorrädern. TU Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Bericht Nr. 270/00, Darmstadt 2000, unveröffentlicht.
- Funke, J., B. Breuer und K. Landau
[Funke et al. 2001: Human Approach to Motorcycle Safety]:
Rider / Motorcycle Interaction – a Human Approach to Motorcycle Safety. In: Proceedings of the 3rd International Motorcycle Safety Conference, Orlando 2001

- Funke, J. und H. Winner [Funke et al. 2004: Anforderungen an zukünftige Kraffrad-Bremssysteme]:
Anforderungen an zukünftige Kraffrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe 12 Fahrzeugtechnik, Heft F 46, Bergisch Gladbach 2004
- Gail, J. und J. Funke [Gail et al. 2003: Beanspruchung von Motorradfahrern beim Bremsen]:
Beanspruchung von Motorradfahrern beim Bremsen mit verschiedenen Kraffradbremsanlagen. In: Neue Aspekte der Fahrzeugsicherheit bei Pkw und Krad. Tagungsband zur BAIS-Frühjahrstagung 2003, Books on Demand Verlag, Nordstedt 2003
- Gallese, V. und A. Goldman [Gallese et al. 1998: Mirror Neurons]:
Mirror Neurons and the Simulation Theory of Mind-Reading. Trends in Cognitive Sciences 1998, Vol. 2, No. 2, S. 493 – 501
- Hoffmann, O., A. Eckert und J. Woywod [Hoffmann et al. 2006: MIB - ein fortschrittliches Bremssystem]:
Das Motorrad Integral Bremssystem MIB: ein fortschrittliches Bremssystem für hochentwickelte Motorräder. In: Tagungsband der 6. Internationalen Motorradkonferenz 2006, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 12 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2006
- Honda Motor Europe (North) GmbH [Honda Presse 1998: 30 Jahre CB 750 four]:
30 Jahre CB 750 four. Presseunterlagen, unveröffentlicht, Offenbach 1998, S. 11
- Honda R&D Europe [Honda 1996: CBS-ABS with TCS]:
CBS-ABS with TCS technical description. Honda-Kundendienst Schulungsunterlagen, unveröffentlicht, Offenbach 1996
- Huber, G., A. Joseph, B. Heß, E. Jakob, W. Stockhausen, A. Berg, M. Lehmann und J. Keul [Huber et al. 1989: Reaktion des menschlichen Organismus' beim Fahren mit Kraffrädern]:
Motorradfahren – Reaktion des menschlichen Organismus' in biochemischer, hormoneller, neuromuskulärer und herzkreislaufspezifischer Sicht beim Fahren mit Kraffrädern verschiedener Leistungsklassen. In: Tagungsbericht zur 3. Fachtagung Motorrad, VDI-Berichte 779, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989

- Iijima, S., S. Hosono, A. Ota und T. Yamamoto
[Iijima et al. 1998: Airbag Study]:
Exploratory Study of an Airbag Concept for a large Touring Motorcycle. In: Proceedings of the 16th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles, Windsor 1998
- Kerwien, H. und H. Ruhdorfer
[Kerwien et al. 2000: Subjektive Sicherheit bei Rennstrecken-
trainings]:
Subjektive Sicherheit bei Rennstreckentrainings für Motorrad-
fahrer. In: Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonfe-
renz 2000, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts
für Zweiradsicherheit, Essen 2000, S. 135
- Kerwien, H.
[Kerwien 2002: Wirkung von Verkehrssicherheitstrainings]:
Ein Kompetenz-Belastungsmodell des Fahrverhaltens: Implika-
tionen für die Wirkung von Verkehrssicherheitstrainings. In:
Tagungsband der 4. Internationalen Motorradkonferenz 2002,
Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 10 des Instituts für
Zweiradsicherheit, Essen 2002, S. 289-306
- Kluth, K., J. Böhlemann und H. Strasser
[Kluth et al. 1996: Beanspruchung des Hand Arm Schulter
Systems]:
Beanspruchung des Hand-Arm-Schulter-Systems in Abhängig-
keit von Arbeitsgeschwindigkeit, Arbeitsfeld und Umlauf-
richtung. In: Strasser, H.: Beanspruchungsgerechte Planung und
Gestaltung manueller Tätigkeiten – Elektromyographie im
Dienst der menschengerechten Arbeitsgestaltung. Ecomed Ver-
lag, Landsberg/Lech 1996, S. 83-110
- Koch, H.
[Koch 2002: Altersstruktur der Motorradfahrer]:
Veränderungen in der Altersstruktur der Motorradfahrer. In: Ta-
gungsband der 4. Internationalen Motorradkonferenz 2002, For-
schungshefte Zweiradsicherheit Nr. 10 des Instituts für Zweirad-
sicherheit, Essen 2002
- Koch, H. und A. Spörner
[Koch et al. 2004: Fahrerassistenzsysteme für das Motorrad]:
Fahrerassistenzsysteme für das Motorrad – sinnvoll oder unge-
eignet? In: Tagungsband der 5. Internationalen Motorradkonfe-
renz 2004, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 11 des Insti-
tuts für Zweiradsicherheit, Essen 2004, S. 369-384
- Koch, J.
[Koch 1980: Untersuchungen des Motorrad-Fahrer-Systems]:
Experimentelle und analytische Untersuchungen des Motor-

- rad-Fahrer-Systems. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Düsseldorf 1980
- Koch, W. [Koch 2000: Vergleichstest Supersportler]: Kraftsport-Verein. In: Zeitschrift Motorrad, 97. Jahrgang (2000), Heft Nr. 14
- Kolling, J. [Kolling 1997: CAD Menschmodell]: Validierung und Weiterentwicklung eines CAD-Menschmodells für die Fahrzeuggestaltung. Hochschulschrift: Dissertation TU München, München 1997
- Kramlich, Th. [Kramlich 2000: Gefahrensituationen für Motorradfahrer]: Noch immer gefährliche Begegnungen. Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer und die resultierenden Verletzungen. In: Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonferenz 2000, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2000
- Kullgren, A., A. Lie und C. Tingvall [Kullgren et al. 1994: Effectiveness of ABS]: The Effectiveness of ABS in Real Life Accidents. In: Proceedings of the 14th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, München 1994, paper 94-S9-O-11, S. 1568-1573
- Landau, K. und H. Winner [Landau et al. 2003: Fahrversuche mit Probanden]: Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, TU Darmstadt 3./4. April 2003, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 557, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003
- Lauster, P., R. Eckert, K. Landau und T. Berggötz [Lauster et al. 1993: Motorhacken]: Analyse der Belastungs- und Beanspruchungssituation beim Arbeiten mit handgeführten, einachsigen Arbeitsgeräten für die Bodenbearbeitung und Ableitung von technischen und organisatorischen Gestaltungsmaßnahmen. Abschlussbericht zum Projekt des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO) Stuttgart, Stuttgart 1993
- Luczak, H., W. Rohmert und K. Landau [Luczak et al. 1992: Arbeitsaufgabe, Anforderung und Belastung]: Arbeitsaufgabe, Anforderung und Belastung. In: Landau, K. und E. Stübler: Die Arbeit im Dienstleistungsbetrieb – Grundzüge

- einer Arbeitswissenschaft der personenbezogenen Dienstleistung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1992
- Lüpertz, H. [Lüpertz 1979: Brems- und Blockierverhalten von Motorrädern]:
Brems- und Blockierverhalten von Motorrädern mit verschiedenen Bremssystemen. Automobiltechnische Zeitschrift, 81. Jahrgang (1979)
- Mannewitz, F. [Mannewitz 2004: Komplexe Toleranzanalysen]:
Komplexe Toleranzanalysen einfach durchführen. In: Zeitschrift „Konstruktion“, Ausgabe Juli/August 2004, S. 69ff
- Otte, D., H. Appel und J. Wüstemann [Otte et al. 1986: Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer]:
Epidemiologie von Unfällen motorisierter Zweiradfahrer in der Bundesrepublik Deutschland – Sicherheitsaspekte. In: Der Motorradunfall – Beschreibung, Analyse, Prävention. Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 3, 1. Aufl., Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1986
- Post, W., B. Bayer und B. Breuer [Post et al. 1984: Kombibremse Motorrad]:
Kombibremse Motorrad. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik. Heft 289, VDI-Verlag, Düsseldorf 1984
- Präckel, J. [Präckel 1996: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS]:
Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Reihe Fahrzeugtechnik Heft F18, Bergisch Gladbach 1996
- Präckel, J. [Präckel 1999: Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung]:
Die Motorradbremsung im System Mensch / Maschine / Umgebung. Diss. TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 384, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999
- Reichel, J. [Reichel 2003: Einfluss stufenlos verstellbarer Schwingungsdämpfer]:
Untersuchungen zum Einfluss stufenlos verstellbarer Schwingungsdämpfer auf das instationäre Bremsen von Personenkraftwagen. Diss. TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 553, VDI-Verlag, Düsseldorf 2003

- Robert Bosch GmbH [Bosch 2005: Produktgeschichte]:
Bosch Automotive – Produktgeschichte im Überblick. Magazin zur Bosch-Geschichte, Sonderheft 2. Hrsg. Robert Bosch GmbH Zentralabteilung Unternehmenskommunikation, Stuttgart 2005
- Rohmert, W. [Rohmert 1992: Beanspruchung, Ermüdung und Erholung]:
Beanspruchung, Ermüdung und Erholung. In: Landau, K. und E. Stübler: Die Arbeit im Dienstleistungsbetrieb – Grundzüge einer Arbeitswissenschaft der personenbezogenen Dienstleistung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1992
- Rohmert, W. und K. Landau [Rohmert et al. 1992: Arbeitsformen]:
Arbeitsformen. In: Landau, K. und E. Stübler: Die Arbeit im Dienstleistungsbetrieb – Grundzüge einer Arbeitswissenschaft der personenbezogenen Dienstleistung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1992
- Rühmann, H. [Rühmann 1988: Isometrische Handschließkräfte an Bremshebeln von Motorrädern]:
Isometrische Handschließkräfte an Bremshebeln von Motorrädern. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 42 (1988), S. 244-250
- Schell, M. [Schell 2002: Untersuchungen zur Mensch Maschine Schnittstelle am motorisierten Zweirad]:
Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle am motorisierten Zweirad. Dissertation an der TU München, München 2002
- Schmidt, L. [Schmidt 1985: FRF-Fragebogen]:
Fragebogen zur Erfassung verschiedener Risikobereitschaftsfaktoren (FRF). In: Bukasa, B. und R. Risser (Hrsg.): Die verkehrspsychologischen Verfahren im Rahmen der Fahreignungsdiagnostik. 1. Auflage, Literas-Universitätsverlag, Wien 1985
- Schmieder, M., D. Bley, M. Spiekermann und V. v. Zettelman [Schmieder et al. 1994: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen]:
Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe 12 Fahrzeugtechnik, Heft F9, Bergisch Gladbach 1994
- Schröder, F. [Schröder 2000: Betriebsweise, Emissionen und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern]:
Betriebsweise, Emissionen und Kraftstoffverbrauch von Motorrädern – Grundlage für realitätsnahe Meß- und Prüfmethode.

- Diss. TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 435, VDI-Verlag, Düsseldorf 2000
- Schröter, M. [Schröter 2002: ABS im Vergleich]:
Ausgebremst – ABS im Vergleich. In: Zeitschrift Motorrad, 99. Jahrgang (2002), Heft 17
- Spiegel, B. [Spiegel 1989: Mesokosmos]:
Was hat der Mesokosmos-Begriff auf einer Motorradtagung zu suchen? In: Tagungsband der 3. VDI-Fachtagung Motorrad, Düsseldorf 1989
- Spiegel, B. [Spiegel 1998: Die obere Hälfte des Motorrads]:
Die obere Hälfte des Motorrads. 1. Aufl., Verlag Heinrich Vogel, München 1998
- Spiegel, B. [Spiegel 1999: Mut zum Bremsen]:
Mut zum Bremsen. In: Zeitschrift Motorrad, 96. Jahrgang (1999), Heft 11, S. 70
- Spiegel, B. [Spiegel 2004: Analyse eines exemplarischen schweren Alleinunfalls]:
Analyse eines exemplarischen schweren Alleinunfalls anhand eines zufällig aufgenommenen Video-Spots. In: Tagungsband der 5. Internationalen Motorradkonferenz 2004, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 11 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2004, S. 119-134
- Sporner, A. und Th. Kramlich [Sporner et al. 2000: Aktive und passive Sicherheit bei Motorradkollisionen]:
Zusammenspiel von aktiver und passiver Sicherheit bei Motorradkollisionen. In: Tagungsband der 3. Internationalen Motorradkonferenz 2000, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2000, S. 55-80
- Sporner, A. [Sporner 2002: Unfallforschung: Bremsen mit Motorrädern]:
Neueste Ergebnisse der Unfallforschung der Deutschen Autoversicherer mit speziellem Schwerpunkt: Bremsen mit Motorrädern. In: Tagungsband der 4. Internationalen Motorradkonferenz 2002, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 10 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2002
- Sporner, A. [Sporner 2003: Bremsen als Todesursache]:
Bremsen als Todesursache! Erkenntnisse der Unfallforschung der Deutschen Autoversicherer. In: Neue Aspekte der Fahrzeug-

- sicherheit bei Pkw und Krad. Tagungsband zur
BAIS-Frühjahrstagung 2003, Books on Demand Verlag, Nor-
derstedt 2003
- Sporner, A. [Sporner 2005: Laufleistungen von Motorrädern]:
Laufleistungen von Motorrädern in Deutschland. Inter-
net-Veröffentlichung des EMI – Europäisches Motorrad Insti-
tut: [http://www.europaeisches-motorrad-institut.de/uploads/medi
a/Laufleistungen1.pdf](http://www.europaeisches-motorrad-institut.de/uploads/media/Laufleistungen1.pdf), Stand 07.01.2006
- Stoffregen, J. [Stoffregen 1999: Motorradtechnik]:
Motorradtechnik. 3. Auflage 1999, Vieweg-Verlag, Wiesbaden
1999
- Tangorra, J. und A. R. George [Tangorra et al. 1991: Wind Noise of Motorcycle Helmets]:
Wind Noise of Motorcycle Helmets. In: Proceedings of the 1991
International Motorcycle Conference: Safety – Environment –
Future, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 7 des Instituts für
Zweiradsicherheit, Bochum 1991, S. 201-228
- Thöle, G. [Thöle 2005: ABS-Ausfall]:
Ausfall-Zeiten. In: ZS Motorrad, 102. Jahrgang (2005), Heft Nr.
16, S. 8f
- Tominaga, Y. [Tominaga 1994: Vibration Exposure and Symptoms when
Using Motorbikes]:
Vibration Exposure and Symptoms in Postal Carriers Using
Motorbikes. In: Nagoya Journal of Medical Science 57, May
1994, Nagoya Univ. School of Medicine, Nagoya, Japan
- Toyofuku, Y., K. Matsushima, Y. Irie, H. Yonezawa und K. Mizuno [Toyofuku et al. 1994: Effects of motorcycle ABS for skilled
and less-skilled riders]:
Study on the effects of motorcycle anti-lock-braking-system for
skilled and less-skilled riders: regarding braking in a turn. JSAE
Review 15 (1994), S. 223-228
- Wagner, A. [Wagner 2000: Bremssystem für Zweiradfahrzeuge]:
Langzeit-Bremssystem für Zweiradfahrzeuge. In: Tagungsband
der 3. Internationalen Motorradkonferenz 2000, Forschungshefte
Zweiradsicherheit Nr. 9 des Instituts für Zweiradsicherheit, Es-
sen 2000
- Weidele, A. und B. Breuer [Weidele et al. 1987: Kombibremsen und ABV]:
Kraftradbremsen – Kombibremsen und ABV. Deutsche Kraft-

- fahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft 301, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987
- Weidele, A. [Weidele 1994: Bremsverhalten von Motorrädern - ABS-geregelte Kurvenbremsung]:
Untersuchungen zum Bremsverhalten von Motorrädern unter besonderer Berücksichtigung der ABS-geregelten Kurvenbremsung. Diss. TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 210, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- Williams, S. und R. Ochs [Williams et al. 2004: Motorcycle Safety Training Professionals]:
Certification Processes for Motorcycle Safety Training Professionals. In: Tagungsband der 5. Internationalen Motorradkonferenz 2004, Forschungshefte Zweiradsicherheit Nr. 11 des Instituts für Zweiradsicherheit, Essen 2004
- Zipp, P. [Zipp 1988: Oberflächenableitung bioelektrischer Signale]:
Optimierung der Oberflächenableitung bioelektrischer Signale. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17, Nr. 45, VDI-Verlag, Düsseldorf 1988

8 Betreute studentische Arbeiten

- [1] Arcalis, Antonio: Auswertung von Versuchsfahrten, Durchführung von Versuchsfahrten auf abgesperrter Strecke. Diplomarbeit Nr. 341/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [2] Bauer, Thomas: Konstruktion einer Ankoppelungskraftmesseinrichtung für eine Motorradsitzbank. Diplomarbeit Nr. 321/99 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 1999
- [3] Behr, Marc-Alexander: Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für X-by-Wire-Systeme am Motorrad unter besonderer Berücksichtigung von Brake by Wire. Wissenschaftliche Hausarbeit Nr. 804/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2001
- [4] Bode, Alexander: Auswertung von Versuchsdaten. Studienarbeit Nr. 844/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2003
- [5] Brack, Tobias: Konstruktion einer Ankoppelungskraftmesseinrichtung für einen Motorradfahrersitz. Studienarbeit Nr. 821/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [6] Bug, Andreas: Untersuchungen zum Bremsüberschlag von Motorrädern. Diplomarbeit Nr. 354/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2003
- [7] Endner, Nils: Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Versuchsfahrten mit einem Versuchsmotorrad. Studienarbeit Nr. 781/00 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2000
- [8] Endner, Nils: Ausrüstung eines Motorrads mit Messtechnik. Diplomarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [9] Hartig, Jens: Ermittlung fahrdynamisch relevanter Größen an einem Versuchsmotorrad. Diplomarbeit Nr. 347/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [10] Heiland, Ralf: Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme einer Ankoppelungskraftmesseinrichtung für Fußrasten an einem Motorrad. Studienarbeit Nr. 767/99 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2000

- [11] Krah, Thomas: Inbetriebnahme eines Versuchsmotorrads und Ausstattung mit Messtechnik. Studienarbeit Nr. 823/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [12] Kuhl, Steffen: Durchführung und Auswertung von Versuchen mit einem Versuchsmotorrad. Studienarbeit Nr. 838/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2003
- [13] Maier, Mario: Erprobung und Vergleich verschiedener Messmethoden zur Erfassung des Rollwinkels von Motorrädern. Diplomarbeit Nr. 337/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2001
- [14] Mayer, Oliver: Konzeptionierung einer Vorrichtung zum Auftrennen des Momentenflusses im Antriebsstrang eines Motorrads während einer ABS-geregelten Bremsung unter besonderer Berücksichtigung der zweiradspezifischen Sicherheitsanforderungen. Studienarbeit Nr. 817/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [15] Mohr, Andreas: Konstruktion einer Bremsmomentmeseinrichtung für ein Motorrad. Studienarbeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [16] Möller-Holtkamp, Robert: Inbetriebnahme einer Hydropulsanlage. Studienarbeit am Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, Darmstadt 2000
- [17] Ramel, Markus: Durchführung und Auswertung von Versuchsfahrten mit einem Versuchsmotorrad. Studienarbeit Nr. 832/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [18] Rolland, Maxime: Konstruktion einer Einrichtung zum Messen der Körperkräfte eines Motorradfahrers an der Schnittstelle Tank/Schenkel. Studienarbeit am Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, Darmstadt 2001
- [19] Schaad, Christian: Konstruktion einer Radlastwaage. Studienarbeit am Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, Darmstadt 2003
- [20] Schlutz, Volker: Durchführung und Auswertung von Versuchsfahrten mit einem Versuchsmotorrad. Studienarbeit am Fachgebiet Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, Darmstadt 2001

- [21] Schmiedel, Patrik: Inbetriebnahme eines Versuchsmotorrads. Studienarbeit Nr. 831/02 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [22] Seiniger, Patrick: Entwicklung einer Routine zur Ermittlung des Rollwinkels eines Motorrads. Studienarbeit Nr. 815/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [23] Speer, Markus: Beitrag zur Entwicklung eines rollwinkelabhängigen ABS Regelalgorithmus für die ABS geregelte Kurvenbremsung eines Motorrads. Studienarbeit Nr. 816/01 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, Darmstadt 2002

Lebenslauf

Persönliche Daten	Name:	Joachim Funke
	Geburtsdatum:	4. Juli 1971
Schulausbildung	1990	Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife
Studium	1991 – 1998	Studium an der TU Darmstadt Studiengang: Allgemeiner Maschinenbau
Beruflicher Werdegang	12/1998 – 11/2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter je zur Hälfte an den Fachgebieten Fahrzeugtechnik (Leitung Prof. Breuer) und Arbeitswissenschaft (Leitung Prof. Landau)
	12/2000 – 05/2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (Leitung bis 09/2001 Prof. Breuer, seit 01/2002 Prof. Winner)